木材の誘電性，とくに誘電率・誘電損率の周波数・含水率および温度への依存性に関する研究

堤　　壽　一

Juichi TSUTSUMI

Studies on dielectric properties of wood.
Effects of frequency, moisture content
and temperature on dielectric constant
and dielectric loss factor.

目　　次

はしがき
1. 緒　　論
2. 実験装置と実験方法
　2.1 測定装置
　2.2 測定値
　2.3 供試材
　2.4 測定条件
3. 木材の誘電率 ε' と誘電損率 ε'' の周波数依存性
　3.1 目　　的
　3.2 実験結果と考察
　3.3 結　　論
4. 木材の誘電率 ε' と誘電損率 ε'' の含水率依存性
　4.1 目　　的
　4.2 実験結果と考察
　4.3 結　　論
5. 木材の誘電率 ε' と誘電損率 ε'' の温度依存性
　5.1 目　　的
　5.2 実験結果と考察
　5.3 結　　論
6. COLE—COLE の円弧則の適用
　6.1 目　　的
　6.2 実験結果と考察
　6.3 結　　論
7. 木材の誘電的挙動と実用場面の関係
8. 結　　論
文　　献
Résumé

この論文に用いた記号のうち，主なもの：Symbols

ε'：誘電率 (Dielectric constant)

ε''：誘電損率 (Dielectric loss factor)

tan δ：誘電正接 (Loss tangent)

u：含水率 (%) (Moisture content in %)

θ：温度 (℃) (Temperature in ℃)

f：周波数 (c/s) (Frequency in c/s)

f_m：ε'' が極大値をもつ周波数 (Frequency at which the dispersion exists)

はしがき

木材の物理的，力学的な性質は，今までに多くの研究者達によって，いろいろの面から研究が行なわれてきている．しかし，実用の上からはもとより，研究の面からも，“静的”な外的条件の印加に対しての木材材質の挙動が，従来多く論じられてきており，ようやく近年に至って，“動的”な外的条件の印加に対する場面が問題にされるようになった．木材を実用に供するとき，たとえば，土木・建築用材にしても，従来は静的荷重のみを配慮し，大きな安全係数を掛けることで十分であったのに対し，近年では，動的な荷重に安全に耐え得ることを必要とする場合が多い．さらに，木材の動的な力学的性質を，材質の非破壊検査に利用するまでに発展してきた．

木材の電気的な性質についても，直流電気抵抗にはじまり，高周波抵抗，誘電率など，交番電圧を受けた木材の電気的な性質の解明へと，つまり，静的な電圧印加から動的な電圧を印加された木材の電気的な挙動の解明に及び，それらの成果の一部は，木材の含水率の測定や，木材の加熱・接着の手段として，実用にも供されている．しかし，交番電圧を受けるとき，周波数が変わることによって，電界の中に置かれた木材が示す挙動にも，変化を生じることは想像に難くない．さらに，今までに発表されている報告のほとんどは，測定の温度条件として，室温と考えられる温度範囲，すなわち，20℃ 前後の狭い範囲についてのみ研究が行なわれており，さらに広い範囲にわたる検討が，研究の面からはもとより，実用上も必要である．また，木材の含水率は，木材材質と大きな関係をもつので，多くの研究者達によって，いろいろの面から研究が行なわれ成果が報告されている．特に，“動的”な性質，たとえば動的な力学的性質，物理的性質への含水率の影響は，温度ならびに周波数とも顕著な相互作用を認め得ると考えることができるので，これらの因子との関連をもって研究を行なう必要がある．

このような観点から，木材の誘電的な性質を通して，木材材質の含水率，温度，さらに周波数に関係する挙動を検討することを目的として，この研究を行なった．

この研究を行なうにあたって，九州大学農学部・渡辺治人教授には，終始懇切な御指導と御援助を賜わり，深く感謝いたします．また，農林省林業試験場木材部・上村武部長には，実験装置の選択にあたって御助言を賜わり，九州大学農学部・松本勗助教授をはじめ木材理学教室の方々に，終始御援助を賜わったことを附記して，厚く御礼を申しあげます．

1. 緒　　論

木材の電気的な性質はかなり古くから研究の対象となり，たとえば，1915年には比留間によって，木材の直流電気抵抗について報告[8]がなされている．その後，多くの研究者達によって，直流電気抵抗について報告され，Stamm, A. J. は木材の含水率の測定を目的として直流電気抵抗を測定し，[26] さらに，木材の繊維飽和点と直流電気抵抗の関係を求めている．[27] さらに，Keylwerth, R.-Noack, D. は木材の直流電気抵抗への温度の影響についてかなり綿密な研究を行なった．[11] その他多くの研究者達によって，要するに，木材の直流電気抵抗は，木材実質中に含まれている水の量に大きな影響を受けることが報告さ

れ，このことは，繊維飽和点以下の木材含水率を測定するための手段として，すでに広く実用に供されている．さらに，木材の直流電気抵抗への温度の影響は，その木材の含水率の多少によって異なることが，CLARK, J. D.-WILLIAMS, J. W. の研究[11]によって明らかにされている．

さて，木材のような吸湿性誘電体では，伝導性の路が，比較的不伝導性の構成単位間の間隙に分散して存在している．このような物質をMURPHY-LOWRY[20]は間隙性伝導系とよび，このような間隙性伝導系の吸着イオンについてつぎのように考えた．すなわち，①吸着イオンは，吸着面のある点に固着しているのではなくて，外部から作用する電場の影響を受け，面の上を移動でき，②吸着イオンを，吸着しているミセルから引き離すにはある限界電圧—解着電圧—を越す電圧が必要である．③また，吸着イオンは，みな同じ強さで吸着されているのではなくて，吸着面からの距離とともに弱くなる．このような諸点について考慮するとき，木材の直流電気抵抗は，測定を行なうときの電圧，温度，時間に影響を受けるので，木材の電気的な性質の本質についての検討を行なうにあたっては，多くの問題点が存在すると考えられる．そこで，詳細な解析を行なうために，交番電界中に木材を置いたとき，その誘電性はどのような挙動を示すかについて研究を行なう必要を認めた．

木材の誘電的な性質については，かなり多くの報告があるが，SKAAR, C.[25]および上村[39]は，おもに誘電率，あるいは誘電力率への含水率の影響について論じ，さらに，HEARMON, R. F. S.-BURCHAM, J. N.[7]は，誘電率と高周波抵抗への周波数の影響についても論じている．そして，TRAPP, W.-PUNGS, L.[34]は，周波数，温度，および含水率の誘電率と誘電正接への影響をかなり詳細に検討している．これらの報告から，木材の誘電率，高周波抵抗，および誘電正接などは，含水率，温度，さらには周波数によって影響を受けることが判るが，測定方法や測定装置によって受ける制約のために，木材の性質を本質的に論ずるに十分な実験結果であるとは言いがたい．このような理由のために，この研究では，広い周波数範囲の交番電界の中に木材を置くことによって，木材の誘電性の異常分散を測定し，誘電的な挙動に検討を加えたい．

異常分散に関係する分極の性質は，電圧を印加したり除去したりするとき，分極が生成，消滅する速さに関係する．すなわち，誘電体に交番電圧を印加すると，周波数が低い間は，電界の変化に対して忠実に追従して分極が起るが，電界が分極固有の振動よりもすみやかに変化するようになると分極は追従できなくなり，いわゆる異常分散が起ることになる．さて，一般につぎのようなことが云われている.[5][16][30] 界面分極は，分極の生成，消滅が最も遅く，10^3c/s 程度の交番電界に対してもほとんど追従できない．双極子分極は約 10^{10}c/s，イオン分極は 10^{12}～10^{13}c/s で赤外部に，電子分極は 10^{14}～10^{15}c/s 程度で認めることができる．

なお，分散の種類には共振型分散と緩和型分散の2種類が考えられる.[22] 前者は，分極あるいは双極子モーメントを生じる荷電体に復元力が働き，荷電体をつり合いの位置に止めようとしていると考えられ，このとき，抵抗力が作用して誘電損失を生じるが，その抵抗力の影響が小さいときには，荷電体の質量と復元力とにより，共振現象が起こり，その周波数の附近で誘電分散を生じる．緩和型分散では，荷電体に働く復元力と，その運動に対する抵抗力が主役を演じ，荷電体の質量が無視できる場合である．そして，界面分極と

双極子分極による分散は緩和型分散に位置し，イオン分極，電子分極は共振型分散である．

普通一般に経験できる周波数は，静的な状態から数 10Mc の範囲であり，木材を実際に利用する場面でも，同じことが云える．また，分極を通して木材の性質を論じるとき，界面分極，さらには双極子分極がとくに重要であることは論をまたない．

この研究では，以上のような理由と，測定装置による制約のために，30c/s～2.5·10⁶c/s の周波数範囲で検討を行なった．また，従来発表されている報告を補うためにも，実験に供する試験片の含水率を全乾状態から気乾状態の範囲，温度条件を −70℃～100℃ の範囲に広げている．

2. 実験装置と実験方法

すでに述べたように，分極の種類によって，異常分散が起こる周波数が異なり，この研究では界面分極，および双極分子分極の範囲について検討を行ないたいことと，現在の誘電体損試験法として確立されているものは，周波数約 10Mc 以下のものにかぎられているので，[28] この研究では 30c/s～2.5·10⁶c/s の範囲について実験を行なった．

2.1. 測 定 装 置

この研究でとりあげている周波数範囲で，考えられる誘電体損測定法は，大別して，ブリッジ法と共振法である．前者が零位法の代表的なもので，比較的低周波で用いるのに適しており，一般に精度が高く，さらにガードを用いることができるため，縁端容量の影響をうけず，誘電的性質の正確な測定が可能である．しかし，ブリッジ法は，周波数の増大とともに測定が困難となり，誤差も大きくなるために高周波では共振法が一般に用いられている．共振法は偏位法であり，零位法より精度が低く，またガードの使用が不可能であるため，縁端容量を除去することが不可能であることの欠点を有する．このような理由から，できるだけ精度を向上させるため，ブリッジ法を採用したい．しかし，ブリッジ法は原理的にはすぐれているが，測定周波数を高めていくと，前述のように，次第に障害を生じるようになる．測定法の種類と適用周波数の概要を Table 1 に掲げる．[41] さいわいに，COLE, R. H. が開発した変成器ブリッジ法[28)29)] は，30c/s から約 5·10⁶c/s にわたる広い周波数で，きわめて簡単に，しかも正確に誘電特性を測定することができる．[1] わが国では，安藤電気株式会社で，この回路が商品化されているので，この研究では変成器ブリッジ法を採用することにした．従来，木材の誘電的性質は，おもに，共振法の一種である Q メーター法，容量変化法などが用いられ，せいぞい 10·10³c/s から 10·10⁶c/s 程度の周波数にわたって研究が行なわれているに過ぎず，もっと広い周波数範囲にわたって研究を行なった TRAPP, W.-PUNGS, L.[34] も数種の測定法を併用している．この研究では，単一の測定方法，測定器によって広い周波数範囲をカバーし，ブリッジ法を採用したことにも，意義があると考えられる．

この研究に用いた変成器ブリッジ法による測定装置は，Photo 1 に示すように発振器，変成器ブリッジ（安藤電気 TR-1B 型），平衡検出装置（安藤電気 BDA-1C 型），および電極槽（安藤電気 SE-1 型）によって構成されている．なお，安定した測定を行なうため

Table 1. 測定法の種類と適用周波数範囲の概要

	測定法	適用周波範囲 (c/s)
ブリッジ法	超低周波ブリッジ	0.1～10
	高電圧シェリングブリッジ	25 ～10^4
	共役シェリングブリッジ	25 ～10^6
	変成器ブリッジ	30 ～ 3×10^6
	並列抵抗ブリッジ	10^3 ～10^5
	直列抵抗ブリッジ(ウィーンブリッジ)	2×10^2 ～10^5
共振法	コンダクタンス変化法	10^5 ～10^7
	容量変化法	10^4 ～10^8
	Q メーター法	5×10^4 ～10^7
	負抵抗法	2×10^5 ～ 2×10^7

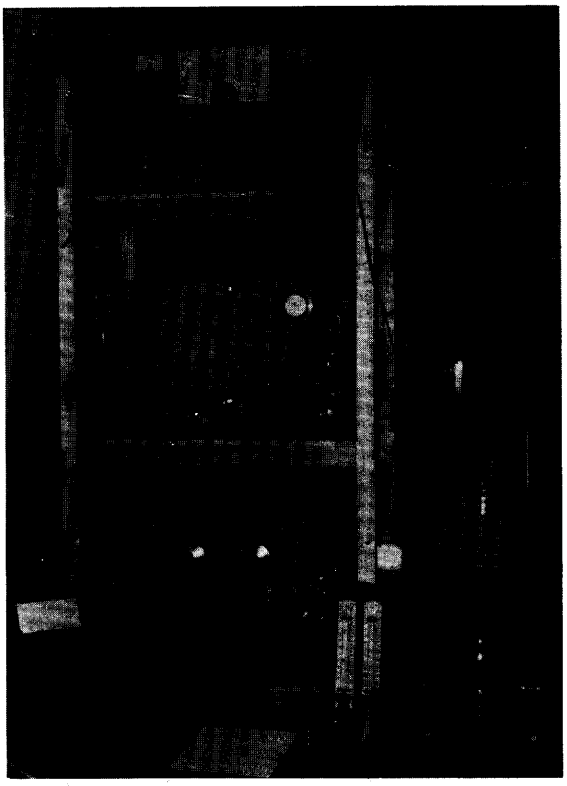
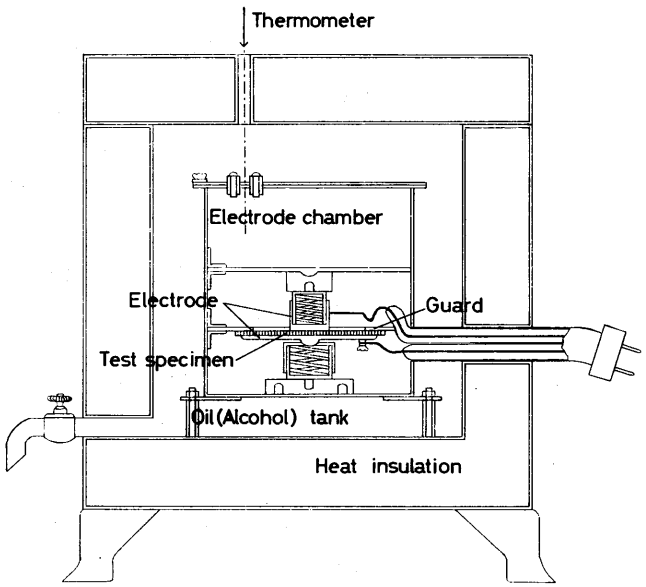


Photo 1. Measuring apparatus.

に，すべての測定装置の電源は電圧安定装置を通し，発振器の発振周波数は常にエレクトロニック・カウンター（タケダ理研 TR-111 D 型）でチェックし，測定中は周波数の変動がほとんどないように，十分に注意をはらった．発振器の出力は，真空管電圧計によって終始監視し，特殊な材料を除き誘電特性は試験電圧によって影響を受けないと云われているが,[16] 供試片への印加電圧が変動しないようにした．また平衡検出装置には，平衡検出のためのブラウン管オッシロ・スコープが自蔵されているが，平衡をより厳密ならしめるた

めに，検出装置の OUT PUT 端子にシンクロ・スコープ（岩崎通信 SS 5102 型）を接続し，ブリッジの平衡検出を容易ならしめた．さらに，電極槽は測定の温度条件を −70℃から 200℃ にわたって変化させるとき，測定に便利なように設計されており，その電極の構造を Fig. 1 に示す．対電極側の導体と，主電極側の導体とは，ガードによって完全に仕切られ，漂游容量を除去する構造になっている．なお，電極槽の絶縁物はマイカレックスとテフロンにより，この電極槽の損失特性は 30c/s～$1\cdot10^6$c/s の範囲で，0.5μ℧ 以下であると云われている．供試片と電極の金属板の間の接触抵抗を減らすために，主電極および対電極はバネによって試験片に圧着されている．なお，主電極の直径は 50mm，38 mm，25mm の 3 種である．電極槽内の温度は，昇温は電極槽の外部容器（ジャケット）と内部容器（気密槽）の間，すなわち，油槽にシリコン・オイルを満たし，それを電熱で加熱することにより，降温は油槽に満たしたメタノールにドライ・アイスを投入することによった．

Fig. 1.



2.2. 測　定　値

この研究に用いた安藤電気株式会社製「広帯域誘電体損測定器（TR-1B 型）」では，静電容量測定ダイアル "*CA*"，静電容量平衡ダイアル "*CB*"，コンダクタンスシフタ・ダイアル "*R*"，コンダクタンス平衡用ダイアル "*G*" を操作することによって，誘電特性を測定する．まず，供試片が電極板の間に挿入されていないとき，コンダクタンスシフタを調整し，平衡点検出器の指示が最小になったときの，

"*R*" の読み	R_0
"*G*" の読み	G
"*CB*" の読み	C_0

とする．つぎに，供試片を電極間に挿入したとき，"*G*" および "*CA*" はそのままの位置にして，"*CB*" と "*R*" で平衡を求める．このときの，

"*CB*" の読み　　C'

"*R*" の読み　　R'

とする．これらから，供試片の静電容量 C_x とコンダクタンス G_x は，次式によって求めることができる．

$$C_x=C_0-C' \qquad \cdots\cdots(2\cdot1)$$

$$G_x=G\cdot\frac{R'-R_0}{100} \qquad \cdots\cdots(2\cdot2)$$

したがって，供試片の誘電率 ε' と誘電正接 $\tan\delta$ は，次式によって求めることができる．

$$\varepsilon'=\frac{C_x}{C_a} \qquad \cdots\cdots(2\cdot3)$$

$$\tan\delta=\frac{G_x}{\omega C_x} \qquad \cdots\cdots(2\cdot4)$$

しかし，C_a は電極の面積，および供試片の厚さから算出した $\varepsilon=1$ の静電容量であり，ω は角周波数で $\omega=2\pi f$（f：周波数）である．

一般に，誘電率は誘電損失も含めて複素数で表わす．すなわち，複素誘電率 ε^* は

$$\varepsilon^*=\varepsilon'-j\cdot\varepsilon'' \qquad \cdots\cdots(2\cdot5)$$

で，虚数部は誘電損失を表わす．そして，

$$\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}=\tan\delta \qquad \cdots\cdots(2\cdot6)$$

だから，

$$\varepsilon''=\varepsilon'\cdot\tan\delta \qquad \cdots\cdots(2\cdot7)$$

となり，ε'' は誘電損率である．

この研究では，誘電的特性値として，上述の測定結果である誘電率 ε' と誘電正接 $\tan\delta$，あるいは誘電損率 ε'' を用い，木材の誘電的挙動について検討を行なっている．

2.3. 供　試　材

木材は，繊維に平行方向の電界の中にあるときの方が，繊維に直角方向の電界の中にあるときよりも大きな誘電率 ε' をもち，両者の間には，明瞭な差があることが SKAAR, C.[25] によって明らかにされている．そこで，この研究では，繊維の方向が電場の方向と正確に一致するように製作した供試片を用いることに統一した．そして供試片の繊維方向に，厚さを約 4 mm とった．供試片の直径は，電極のガード・リング径との関係もあるので，約 8～9cm とした．

この研究の目的は，木材の誘電的挙動についての知見をうることであるので，樹種はできるだけ少なくし，誘電率が余り低くない樹種，さらに，含水率や温度に関する特性を実験するとき，供試片に加える乾燥，加湿，温度変化などによって，障害を受けにくいことを要するので，予備実験から経験的に，次の 3 樹種を選んだ．

(1) ヤ ナ ギ　　*Salix* spp.

(2) サ ク ラ　　*Prunus* spp.

(3) ブ　　ナ　　*Fagus* spp.

とくに，大部分の実験はブナによってのみ行ない，実験で得たデータの解析を容易にした．また，各供試片ごとの材質のバラツキを小さくするために，繊維方向にとなりあって約15個の供試片をとり，それぞれの供試片は繰り返して，異なった条件の測定に用いた．なお，同一供試片で異なった条件の測定を繰り返して行なうことによる履歴の影響は，ほとんど認められないことが予備実験で確かめられている．

2.4. 測 定 条 件

木材の誘電的特性への影響因子のうち，この研究では木材の含水率 u(%)，温度 θ (℃)，供試片が挿入されている電界の周波数 f をとりあげた．

全乾状態から気乾状態にわたって測定を行なったが，気乾状態の木材を加熱することによって含水率を下げるために懸念される熱履歴を，各供試片ともに均等化する目的で，全部の供試片を 103±0.5℃ の熱風乾燥機で全乾状態まで乾燥させ，ついで大気中に放置して，目的とする含水率まで吸湿させたのちシャーレ中に密封し，約3週間後に実験に供した．測定中の含水率の変化はほとんどなく，高含水率，高温度，あるいは低温度による測定のときの蒸発，結露のための含水率変化でも，約 0.5%以下におさえるようにし，この条件に満たない場合のデータは用いなかった．なお，測定を終わった供試片は，さらに目的とする含水率になるまで吸湿させ，約3週間シャーレ中に密封放置ののち，次の実験に供した．

この研究は，木材の誘電的性質の温度依存性を検討することを目的の1つとしているために，供試片の温度調整には十分注意した．すなわち，電極間に供試片をセットし，電極槽の温度が −70℃ から 100℃ の範囲にわたって，目的とする温度に達したあと約8時間恒温を持続させ，そのあと測定を行なった．そして，測定中も恒温に保つよう十分に注意した．なお，室温よりも高い温度条件の場合，電極槽の電熱源に鋭感リレーを接続し，槽内の温度変動が ±0.5℃ 以内になるようにした．また，室温より低温での測定は，電極油槽の寒剤メタノール中に，白金抵抗体温度検出棒を挿入し，これによってリレーを動作させ，目的とする温度の ±1.0℃ の範囲を超すときに警報を発するようにし，終始温度を監視した．

測定を行なった周波数は，高周波側から，$5\cdot10^6$c/s，$2.5\cdot10^6$c/s，$1.5\cdot10^6$c/s，$800\cdot10^3$c/s，$400\cdot10^3$c/s，$200\cdot10^3$c/s，$100\cdot10^3$c/s，$40\cdot10^3$c/s，$10\cdot10^3$c/s，$3\cdot10^3$c/s，$1\cdot10^3$c/s，300c/s，100c/s，50c/s，30c/s の15段階の周波数とし，それぞれの周波数をチエックするために，エレクトロニック・カウンターで周波数の誤差が0.01%以下になるように測定中監視した．

3. 木材の誘電率 ε' と誘電損率 ε'' の周波数依存性

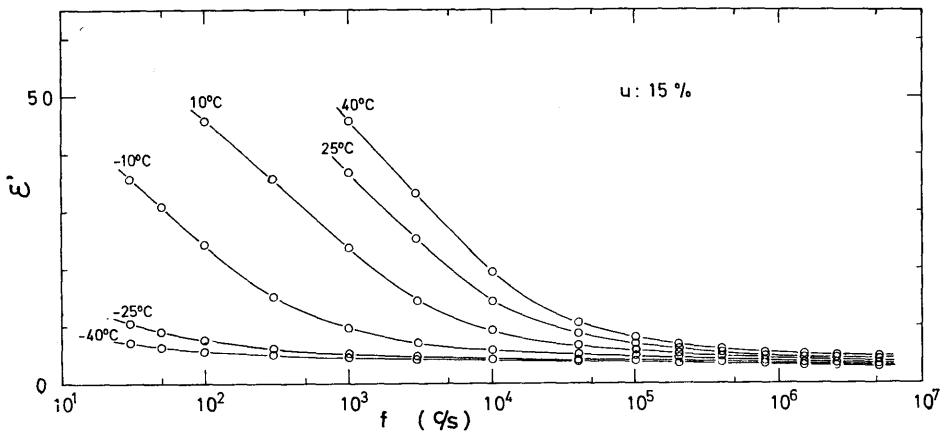
3.1. 目　　的

物質は電気的性質によって，導体と絶縁物に分けることができる．そして，絶縁物と云えども，絶縁物中の荷電粒子は，電圧が印加されるとき，たとえばイオン内，結晶格子内，結晶粒界の内部など限定されたある距離の変位は行ない得る．このような誘電体の誘電性は，電界の変化に追随できるか否か，そして，追随できなくなり，その分だけ ε' が低下す

る現象，そして ε'' が極大値をもつ現象，すなわち分散が問題となる．このようにして生じる誘電分極のうち，この研究では界面分極と双極子分極を特にとりあげ，30c/s～$5\cdot10^6$ c/s の範囲で検討を行なっている．木材の誘電性に関しての従来の報告は，Qメーター法によって測定されたものが多く，おもに，約 $50\cdot10^3$c/s～約$20\cdot10^6$c/s の範囲で測定が行なわれ，精度も十分であるとは云いがたい．すなわち，低周波域での測定は，界面分極との関連で非常に重要な意義をもつと考えられるが，測定法が困難な因子を含んでおり，従来，十分に検討がなされていない．そこで，この研究では広い範囲の周波数にわたって，十分に高精度を期待できる変成器ブリッジ法を用い，従来ほとんど検討されていない木材の低周波領域の異常分散についても検討を行なっている．

ヤナギの気乾材（u=15%）で得た ε'，tan δ と周波数の関係を Fig. 2 に，サクラの気乾材（u=15%）で得た ε'，tan δ と周波数の関係を Fig. 3 に示す．ヤナギ，およびサクラのいずれの気乾材においても，低周波方向と高周波方向の両方向に向って，tan δ は上昇し，周波数の上昇に伴って ε' は低下することが認められ，木材の誘電性に異常分散が

Fig. 2 - a)



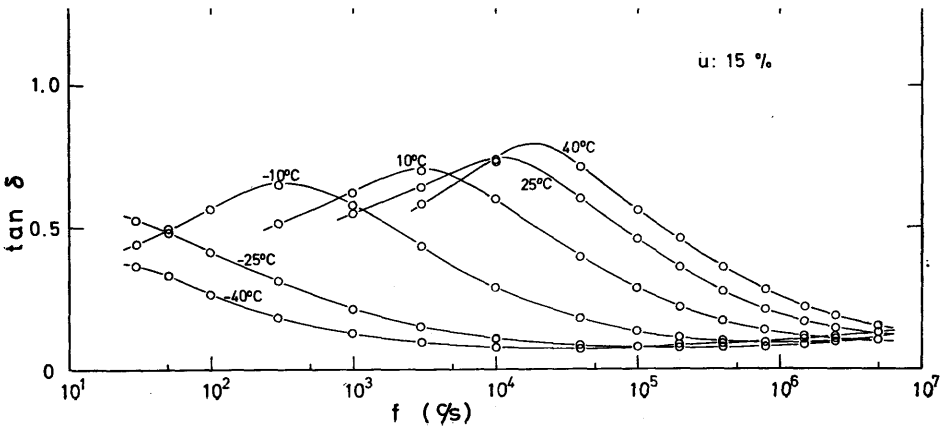


Fig. 3 - a)

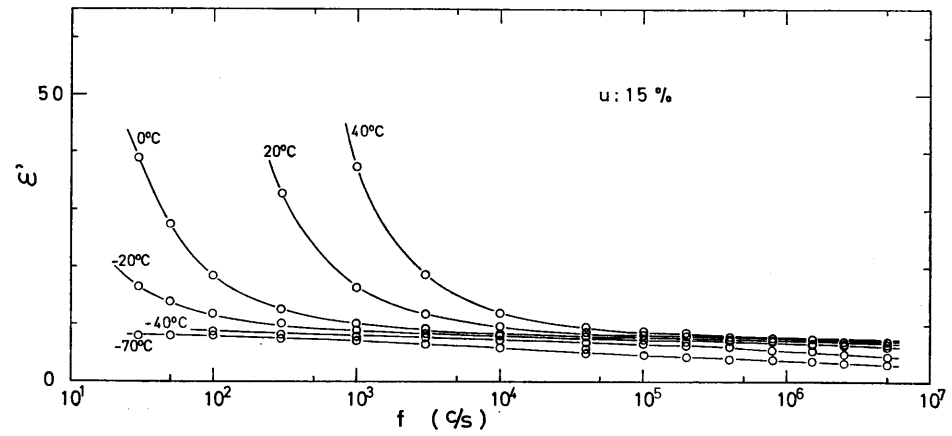


Fig. 3 - b)

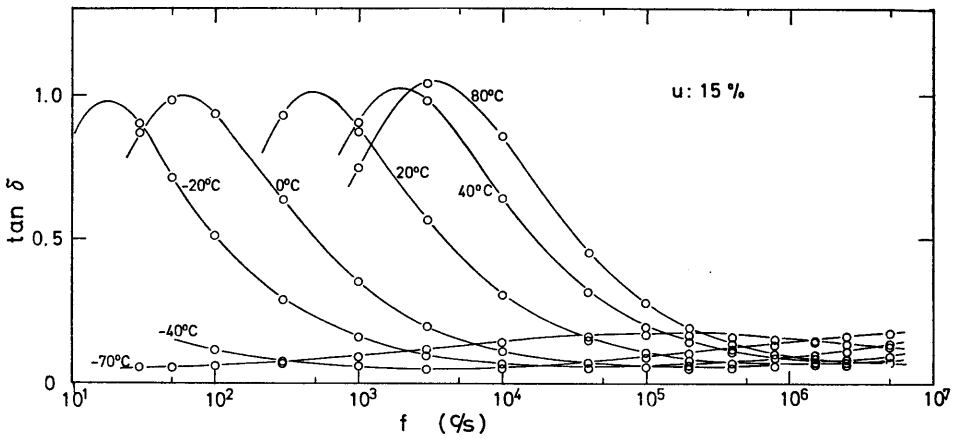
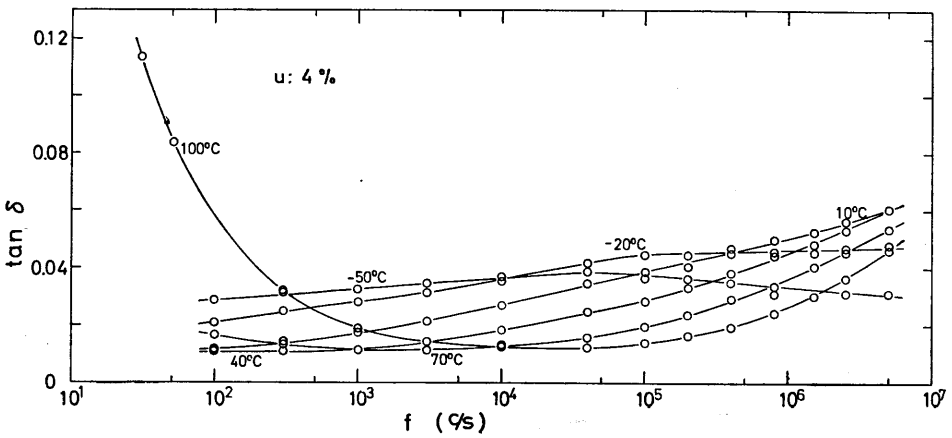


Fig. 4



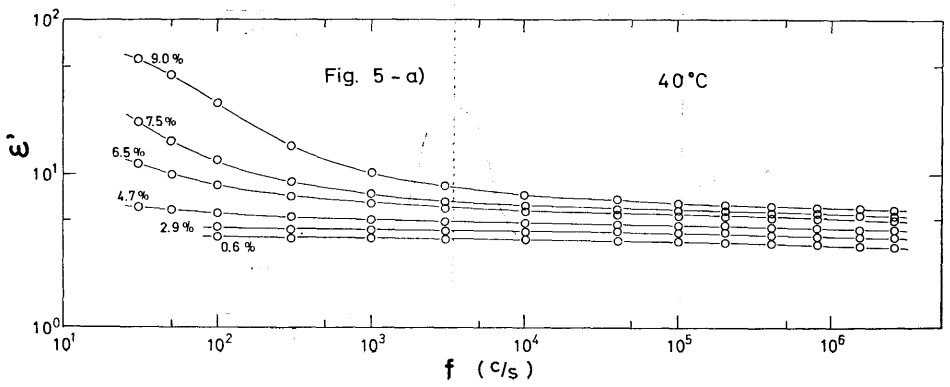
存在することを示している．さらに，サクラをシリカゲルの粉末の中に約3ケ月間放置し含水率を4％に乾燥したのち，tan δ と周波数の関係を求め，Fig. 4 にその結果を示す．この場合，低周波側の異常分散は，気乾材に比べて顕著でなくなった．しかし，高周波側の分散はいぜん顕著である．Fig. 2～Fig. 4 から，木材の誘電的性質は温度，含水率，周波数が変化すると異なった挙動を示し，特に低周波側に存在する異常分散は，含水率によって顕著な影響を受けることがわかる．さて，BRAKE-SCHÜTZE[20] はブナ，カシ，シラカバ，およびマツで tan δ と周波数の関係を 10^3c/s～10^7c/s の範囲で求め，木材中に水が存在するとき，低周波側と高周波側に tan δ の分散の存在が推定でき，全乾材では高周波領域の分散のみを認めうる結果を得ている．HEARMON, R. F. S.-BURCHAM, J. N.[7] は 10^3c/s～10^7c/s の範囲で，TRAPP, W.-PUNGS. L.[34] は 10^2c/s～10^9c/s の範囲で，類似の結果を得ている．そこで，この研究では木材の誘電性への周波数の影響について，より詳細な知見を得るために，ブナを供試材として用い，含水率をほぼ全乾から約10％の範囲で変化させ，温度が－70℃～100℃ の範囲にわたって，ε' と ε'' を求め，周波数との関係を検討した．

3.2. 実験結果と考察

Fig. 5 は温度 40℃ で，30c/s～$2.5\cdot10^6$c/s の範囲で周波数を変化させたときの，ε' と ε'' の挙動を示す．ほとんど全乾に近い（u=0.6％）とき，低周波領域では，ε'，ε'' は周波数が変化しても顕著な変化を示さないが，高周波の部分では，周波数の変化による顕著な影響が認められる．さて，一般の誘電体の ε'，ε'' について，次のようなことが認められている．[41] すなわち，Fig. 6 に示すように，ε' が急変して変曲点をもつ周波数部分―異常分散が存在する位置―で ε'' は極大値をもち，その位置に誘電吸収が存在することがわかっている．Fig. 5 の高周波領域で，ε' が周波数の増加に伴って僅かながら減少し，ε'' は高周波部分で極大値をもつことは，結局，異常分散の存在を示していることにほかならない．そして，ε'' が極大値をもつ周波数 f_m から，この場合の平均緩和時間 τ_0 が求められる．すなわち，

$$\tau_0=\frac{1}{2\cdot\pi\cdot f_m} \qquad \cdots\cdots(3\cdot1)$$

だから，Fig. 5 から u=0.6％のとき，$f_m\fallingdotseq10^7$c/s となり，$\tau_0=\dfrac{1}{2\times3.14\times10^7}\fallingdotseq1.6\cdot10^{-8}$ [sec] を得る．含水率が9％にもなると，ε' は低周波の部分では，全乾に近い場合よりも



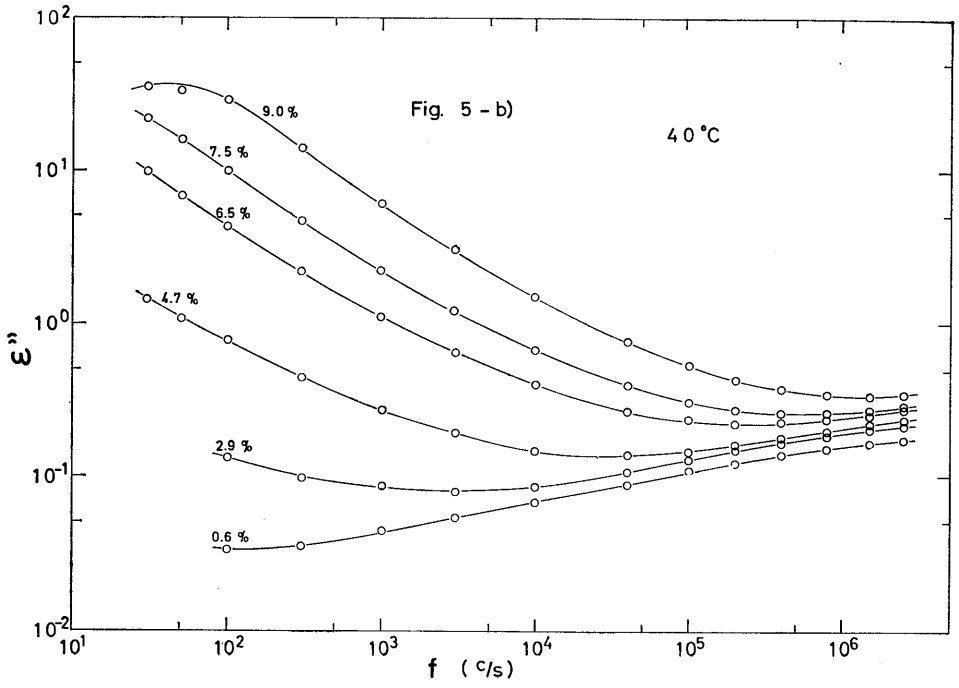
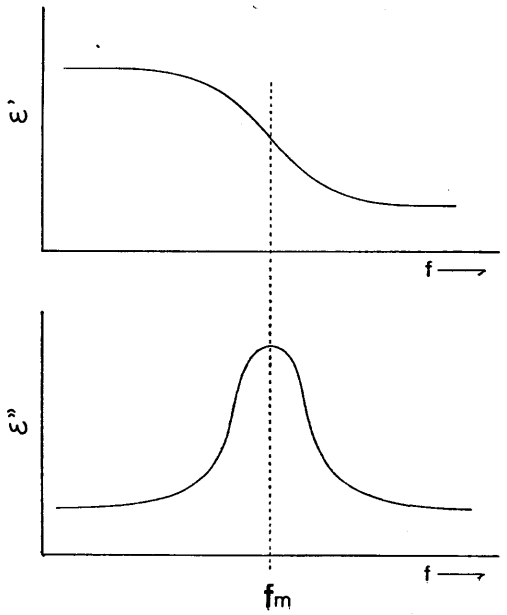


Fig. 6



1桁高い値をもつようになる．そして，約 $10\cdot10^3$c/sに至るまで，ε' は周波数の上昇に伴って急勾配で減少し，より高い周波数ではほとんど平坦な曲線で表わされる．なお，ε''は約 30c/s 附近で極大値をとり，さらに，$10\cdot10^6$c/s よりもはるかに高い周波数でも，極大値をとることが推定できる．約 30c/s の分散の平均緩和時間は，$\tau_0=\frac{1}{2\times3.14\times30}\fallingdotseq 5.3\cdot10^{-3}$[sec] となり，高周波部の異常分散は，この実験でカバーしている周波数よりも高周波部に存在するので，この実験で得た結果の範囲では，τ_0 を算出できない．含水率が0.6%のものと9.0%のものの誘電性の差として，前者では低周波領域で異常分散を認め得なかったが，後者では低周波領域における顕著な異常分散を認めることができた．高周波領域の異常分散は，両者ともに認め得たが，高い含水率の場合の方が，低い含水率の場合よりも高い周波数の部分に異常分散をもっていると推定できた．そこで，木材の誘電性の周波数依存性への，含水率の影響を明らかにするために，さらに u=2.9%，4.7%，6.5%，7.5% の場合の ε' と ε'' を Fig. 5 に挿入してみると，ε' とε'' のいずれでも，含水率が高いものから低いものへ，曲線は上方から下方へ向って，順次並ぶことがわかった．そして，u=2.9%のものでは，すでに，低周波領域で ε'' の増加が認められ，さらに含水率が増加するに伴って，低周波領域における異常分散は顕著となり，含水率が低いものほど，異常分散が現われる位置は超低周波方向へ移動することが認められる．高周波部の分散は，含水率が低いものから高いものまで，いずれの含水率においても認められるが，u=0.6%と2.9%のものでは，ほぼ $\tau_0=1.6\cdot10^{-8}$[sec]となり，さらに含水率が増加するに伴って，異常分散は高周波方向へ移動し，τ_0 は短時間側へ移動することががわかった．

さて，1〔緒論〕で述べたように，誘電分散のうち，緩和型分散には界面分極によるものと双極子分極によるものの2つが考えられ，前者は超低周波領域，後者はマイクロ波領域に存在すると云われている．超低周波領域の分散は 100c/s 以下 0.001c/s におよぶ低い周波数でおこることもあると云われ，その原因の大部分が誘電体の導電性に基づくので，導電性分散と考えることもできる.[22] すなわち，電気伝導によって荷電体が固体中を移動し，界面に停止して界面電荷を生じたり，界面に近い薄い層に蓄積して空間電荷層（space charge layer）を生じることになる．このようなことから，ほとんど全乾に近い木材では，導電性を持つための条件である水の存在が少ないために，誘電分散は顕著でなく，含水率の増加とともに，すなわち木材の導電性の上昇とともに低周波部の誘電分散が顕著となってくることが推定できる．Fig. 5 の u=0.6%で認めることができなかった異常分散が，u=4.7%になるとかなり顕著となることは，このようにして説明できる．さらに，木材の実質—たとえばセルロース—の吸着点に吸着されている水は，含水率が高いと吸着点からの距離がいろいろと異なって存在すると考えられ，吸着点からの距離が遠いものほど吸着されている力は弱いと見なされ，吸着水はいろいろの緩和時間をもって存在すると考えることができる．結局，吸着点からの距離の増加とともに，緩和和時間は減少する．このことから，Fig. 5 の低周波領域における分散が含水率の増加とともに高周波側へ，すなわち，平均緩和時間 τ_0 が短時間側へ移動することの説明ができる．木材の誘電性に関する従来の報告では，測定装置の制約などもあり，$10^{2\sim3}$c/s 以下の周波数における研究が不十分であったので，他の研究者の報告とこの研究の結果とを対比させて，十分な検討を行なうことはできないが，次のようなことは云えそうである．Von Hippel, A. R.–Dietz, A. G. H.[9](1942) は，u=7%の mahogany で，100c/sより低い周波数で異常分散の存在が推

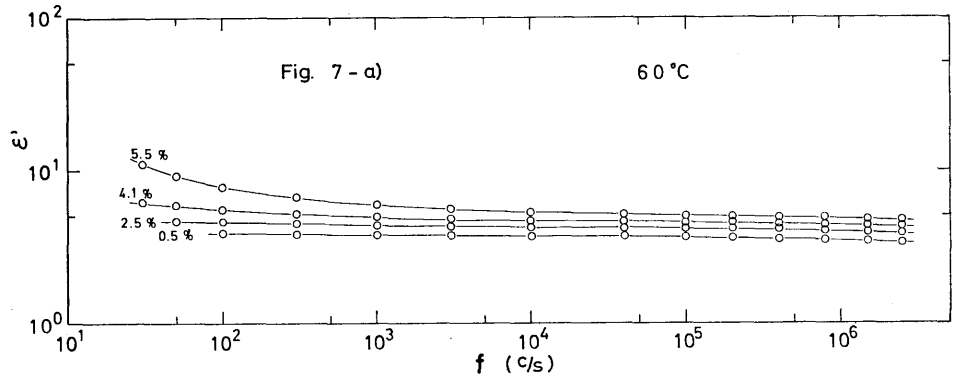
定できる結果を得ている．HEARMON, R. F. S.-BURCHAM, J.N.[7] は，sitka spruce と oak の tan δ を $2\cdot10^3$c/s 以上の周波数で求め，$u=1\%$では周波数の減少とともに tan δ は単調に減少し，tan δ の極大値は $u=9\%$ で $10\cdot10^3$c/s よりもはるかに低周波側に，$u=15\%$では $100\cdot10^3$c/s よりはるかに低周波側に存在することが推定できる結果を得ている．KRÖNER, K.-PUNGS, L.[13] は Rotbuche を用い，温度 20℃ のとき，木材中に水が存在すれば，$10\cdot10^3$c/s 以下で周波数の減少とともに tan δ の値は増加することを報告している．さらに，TRAPP, W. -PUNGS, L.[34] は Fichte で温度 40℃ のとき，全乾材の ε' と tan δ は低周波領域で周波数の影響をうけることなく，$u=3\%$では $5\cdot10^3$c/s 以下で周波数の減少とともに tan δ の増加が認められ，$u=6.5\%$ では $100\cdot10^3$c/s 以下で同様の挙動を認めている．ε'' は (2·7) 式に示すように，tan δ と ε' の積だから，分散域で変化する ε' のために，ε'' と tan δ の挙動が全く一致するものではない．しかし，すでに述べたように HEARMON-BURCHAM と TRAPP-PUNGS が得た結果からも，木材の誘電性には低周波領域における異常分散が存在することは否めない．この研究で，低周波領域における異常分散の平均緩和時間 τ_0 を，$u=9.0\%$で $\tau_0=5.3\cdot10^{-3}$[sec] と得たが，もっと低い含水率における τ_0 は，もっと超低周波領域も測定できる測定装置を用いることが必要であり，今後の研究課題である．

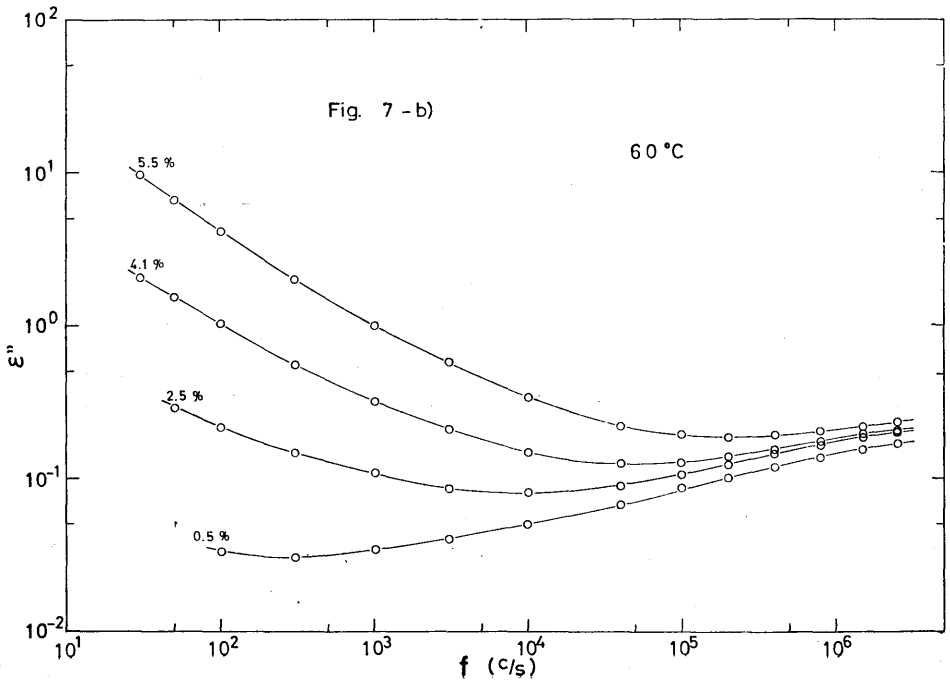
以上は低周波領域に存在する異常分散—界面分極に原因すると考えられる分散—について論じたが，高周波領域に存在する異常分散—双極子分極に原因すると考えられる分散—は，かなり多くの研究者によって研究の対象となってきた．VON HIPPEL, A. R.-DIETZ, G. H.[9](1942) は $u=7\%$の mahogany で $f\fallingdotseq10^8$c/s，全乾状態の birch で $f\fallingdotseq10^{20}$c/s に異常分散を認めている．TAKEDA, M.[33] は *Tilia* 材を用いて 15℃ のとき，$u=3.5$～20%で，$f\fallingdotseq10^8$c/s 附近に異常分散を認め，これは木材の結合水として存在する水の双極子の回転によると結論している．ちなみに，自由水の状態の純水の分散は，15℃ のとき，TAKEDA, M. によると，10^9～10^{10}c/s 附近にあることが報告されている．[33] KRÖNER, K.-PUNGS, L.[13] は全乾状態にある Rotbuche, Fichte, Eiche, Kiefernholzmehl, Buchenholzmehl, Buchenholzzellstoff で温度 20℃ のとき，tan δ の極大値が $f\fallingdotseq0.5\cdot10^7$～$10^7$c/s の範囲 (Buchenholzzellstoff のみ $f\fallingdotseq2.6\cdot10^6$ c/s) に存在したとし，これから $\tau_0\fallingdotseq1.6\cdot10^{-8}$[sec] と報告している．もっとも，tan δ が極大値をとる周波数の位置を分散の位置としているので，この研究で得た値とは少々異なると考えられるが，測定温度を考慮に入れても，τ_0 の値としてこの研究で得た $\tau_0=1.6\cdot10^{-8}$[see] とよく一致していると考えることができる．TRAPP, W.-PUNGS. L.[34] は Fichte で，温度 45℃ のとき全乾状態で $f\fallingdotseq10^7$c/s，温度 40℃ $u=3\%$で $f\fallingdotseq10^8$c/s，温度 40℃ $u=6.5\%$で $f\fallingdotseq5\cdot10^8$c/s に tan δ の極大値が存在したと報告し，これらの値も，この研究で得た結果とよく一致している．

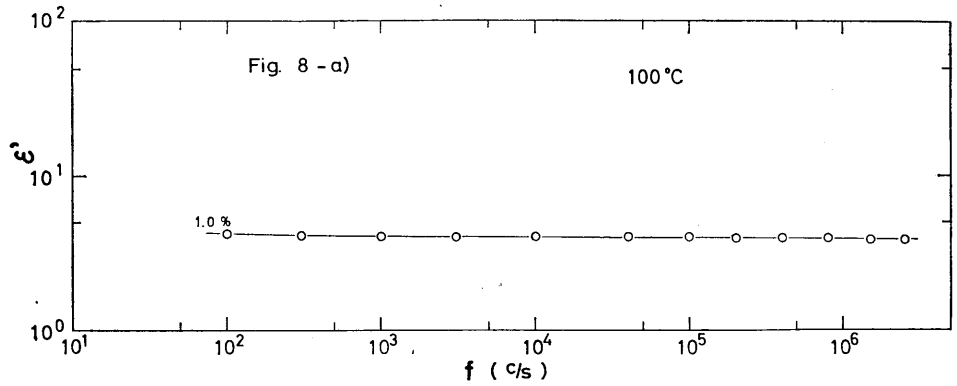
木材実質中に吸着されている水—吸着水—の双極子回転，および木材実質，たとえば，木材セルロース中の −OH 基の双極子回転が，いま対象としている異常分散に相当するので，含水率の減少とともに，すなわち，吸着水の減少とともに，水の双極子の回転は束縛された状態となり，双極子回転の緩和時間 τ は大きくなる．そして，全乾状態になればセルロース中の −OH 基の双極子回転の緩和時間 τ によってのみ分散は存在する．結局高周波領域の異常分散は，含水率の減少とともに低い周波数側へ移動することになる．

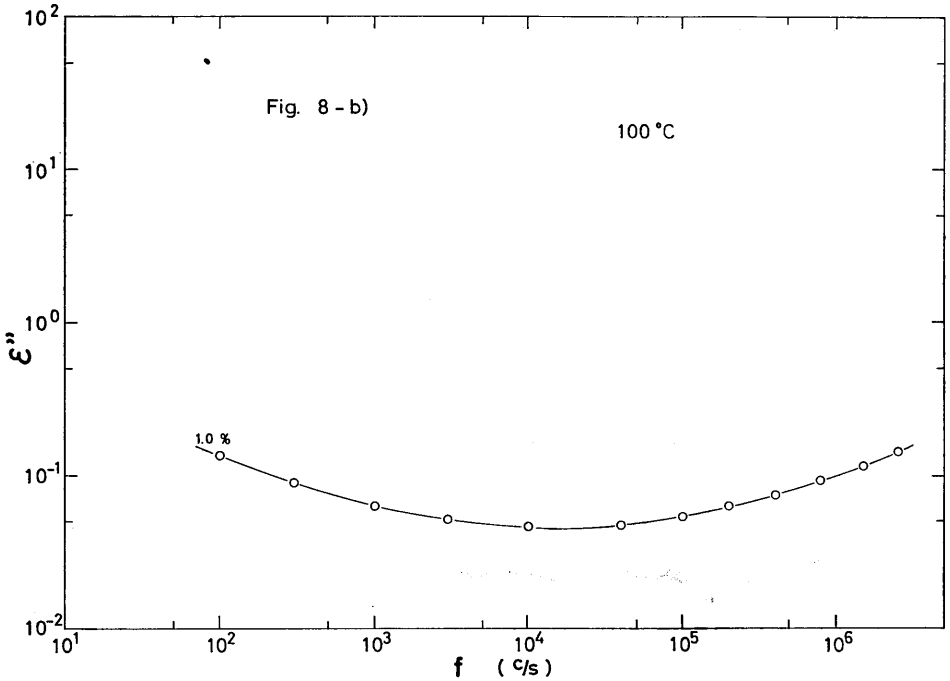
通常，平均緩和時間 τ_0 は温度上昇につれて指数関数的に減少するので，異常分散を認

める周波数 f_m は，温度の上昇とともに高周波側に移動すると云われている.[41] そこで，いろいろの温度の場合の，木材の誘電的挙動の周波数依存性について検討を行なった．まず，温度 60℃ のとき得られた結果を Fig. 7 に示す．温度 60℃ でも，低周波領域での異常分散は含水率の増加に伴って顕著となるが，$u=0.5\%$のものでは，低周波領域での異常分散は，前述の温度 40℃ の場合と同様にほとんど認められない．高周波領域での異常分散は，温度 40℃，$u=0.6\%$で得た $f_m \fallingdotseq 10\cdot10^6$c/s に比べ，温度 60℃，$u=0.5\%$では $f_m > 10\cdot10^6$c/s となり，高い周波数側へ移動している．温度が 60℃ になると，電極槽内で供試片を高含水率に保つことが非常に困難となるために，高含水率で，かつ高温度の場合の ε'，および ε'' の周波数依存性を測定できない．そのために，特に低い周波数領域の異常分散が，高い温度によって受ける影響は検討できなかった．なお，低含水率，高温度





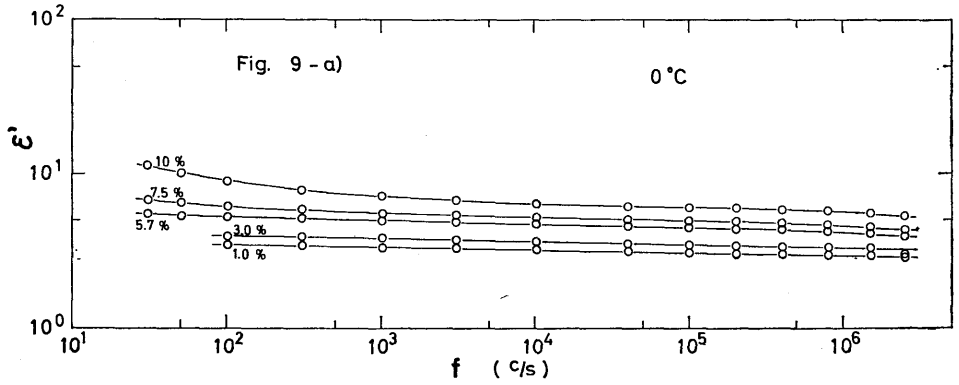


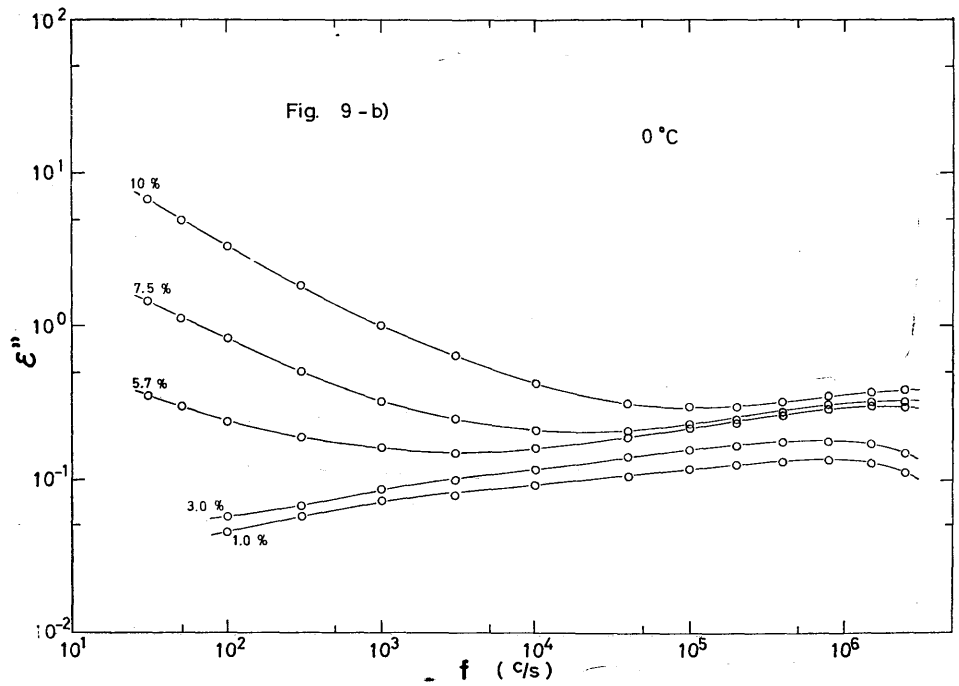


で得た結果として，Fig. 8 に温度 100℃ の場合の ε', ε'' と周波数の関係を示す．周波数の減少とともに，低周波領域で，ε' と ε'' のいずれも僅かながら増加している．そして，高周波領域における異常分散は，$10\cdot10^6$c/s よりもはるかに高周波部に認められるであろうと推定できる．TRAPP. W.-PUNGS, L.[34] によって，全乾状態の Fichte 材で得られた結果を見ると，温度 100℃，周波数が 40c/s 以上のとき，周波数が減少するに伴って tan δ の値が増加する傾向—異常分散の存在—は認められなかった．勿論，ε' は 40c/s～10^8c/s にわたって，周波数の影響を受けることなく一定の値を示しているので，ε' と tan δ の積である ε'' の挙動は tan δ の挙動と全く一致する筈である．なお，全乾状態の Fichte 材で，高周波領域における tan δ の極大値は，$\theta=45$℃ で $f_m=10^7$c/s であったが，$\theta=100$℃ では $f_m\fallingdotseq10^9$c/s となっており，温度の上昇に伴って高周波領域の異常分散は周波数が高い方へ，換言すれば，τ_0 は短時間側へ移動したことになり，この研究で得た結果とよ

く一致する．さらに，TRAPP-PUNGS は $u=6.5\%$ の Fichte で，温度 100℃ のとき 10^6c/s 以下で，周波数の低下に伴って tan δ の増加をみ，高周波領域の異常分数は $f_m>10^{10}$c/s に存在することを報告している．温度の上昇に伴って界面分極，双極子の配向分極ともに運動が活潑となり，このことはとりもなおさず，交番電界の交番の速さに分極が追随できる能率が向上し，温度の上昇は緩和時間の短縮をもたらしたものと考えることができる．

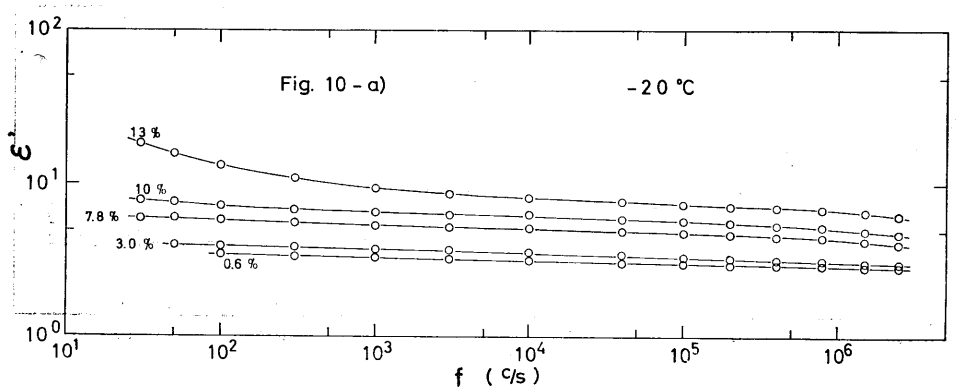
つぎに，温度を降下させるとき，上に述べた温度上昇の場合に反して，界面分極，双極子分極ともに分極が束縛されることになる筈である．まず，Fig. 9 に温度が 0℃ のときの ε' および ε'' の周波数に対しての挙動を示す．含水率が 1 %のとき，周波数 $10\cdot10^3$c/s を境にして，低い周波数で ε' はほとんど変化しないが，高い周波数で ε' は減少し，ε'' は極大値をもつ．すなわち，$u=1\%$のブナで，$f_m\fallingdotseq500\cdot10^3$c/s となり，$\tau_0\fallingdotseq3.2\cdot10^{-7}$[sec]

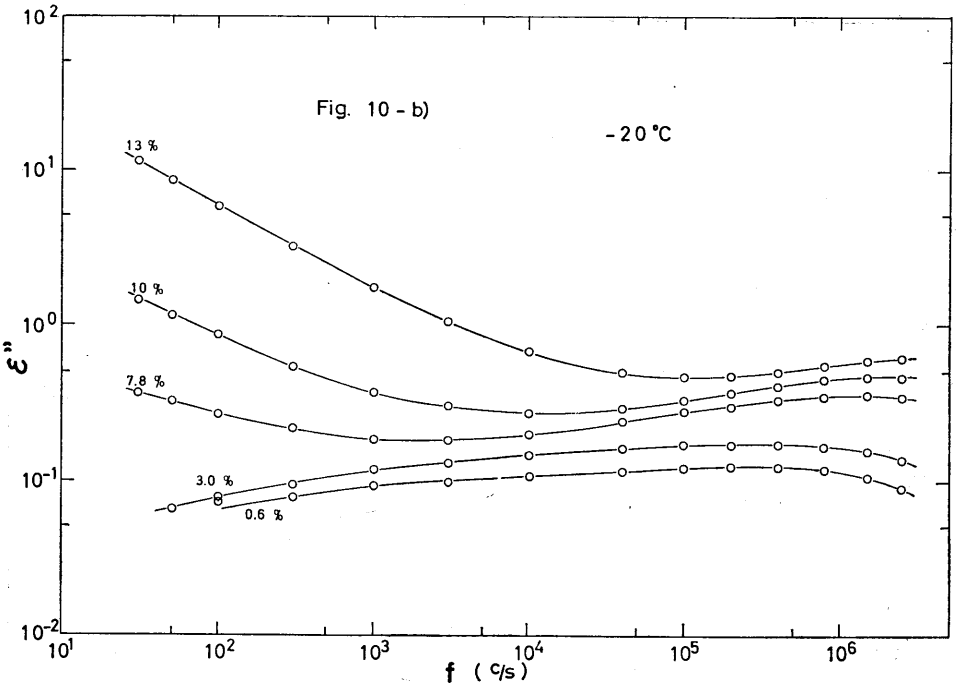




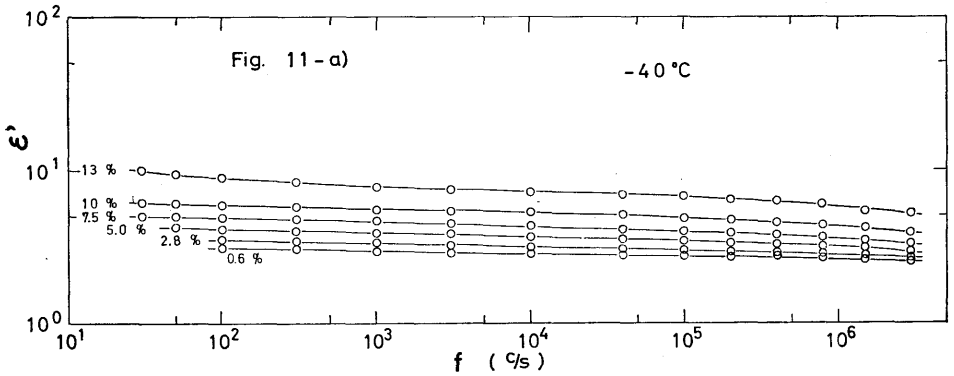
を得る．この異常分散は高周波側のもの—双極子の配向分極に原因するもの—であり，$\theta=40℃$, $u=0.6\%$ で $\tau_0\fallingdotseq 1.6\cdot10^{-8}$[sec] であったのに比較して，温度の降下とともに，平均緩和時間 τ_0 は顕著に長時間側へ移動したことになる．$u=3\%$でも，$u=1\%$に於けると同じように $\tau_0\fallingdotseq 3.2\cdot10^{-7}$[sec] を得るが，$u=6\%$で $f_m\fallingdotseq 1.5\cdot10^6$c/s $\tau_0\fallingdotseq 2.1\cdot10^{-7}$[sec]，$u=7.5\%$，で $f_m\fallingdotseq 2.0\cdot10^6$c/s $\tau_0\fallingdotseq 8.0\cdot10^{-8}$[sec] を得，$u=9.4\%$では $f_m>3\cdot10^6$c/s となり，$\tau_0<5.3\cdot10^{-8}$[sec] である．高い温度条件で得られた τ_0 に比べて，低い温度条件の平均緩和時間 τ_0 は長時間の方へ移動しており，さらに，含水率の低下とともに平均緩和時間 τ_0 は長時間側へ移動している．

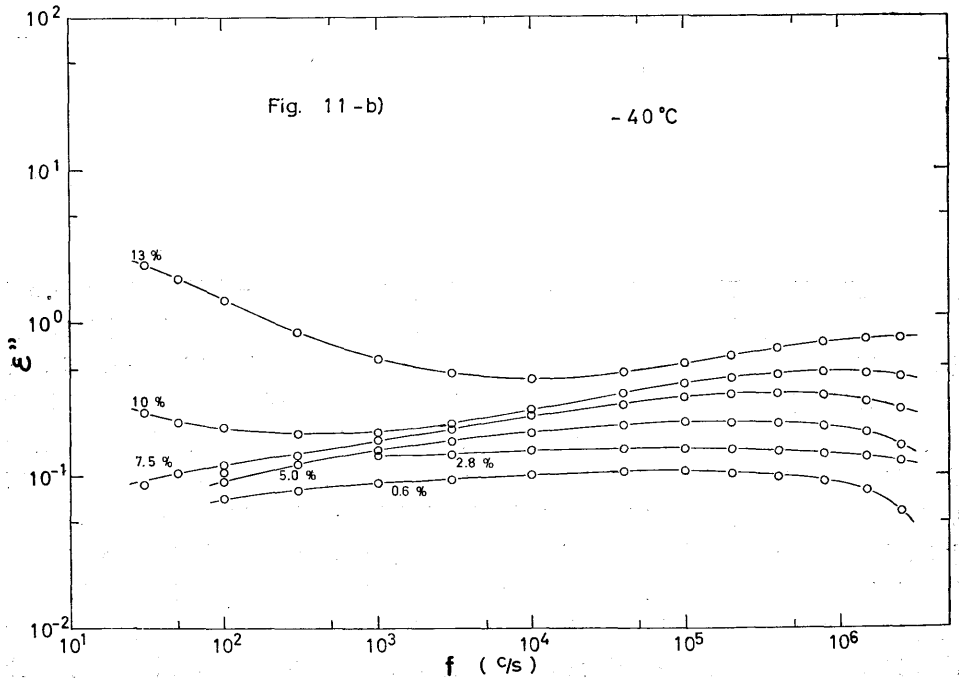
さて，木材の誘電性に関する従来の研究は，おもに常温以上の温度条件でなされているので，低温における木材の誘電的挙動については，まったく未知の点が多く残され，ε' や ε'' の周波数依存性への温度の影響はほとんど検討されていない．水および氷の誘電性は，温

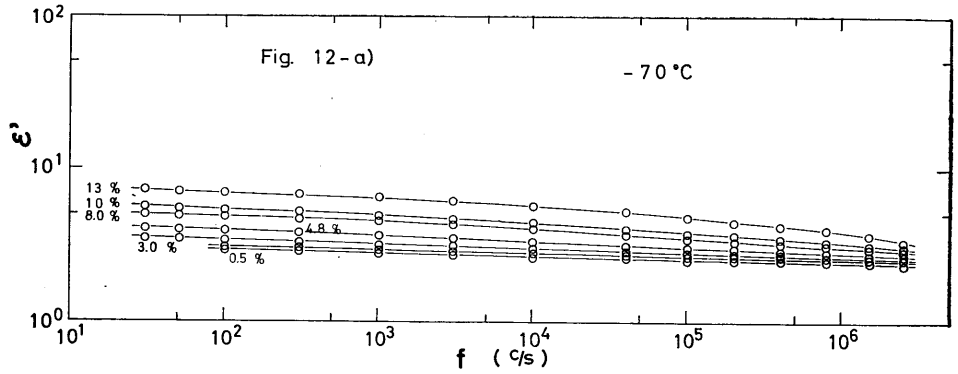


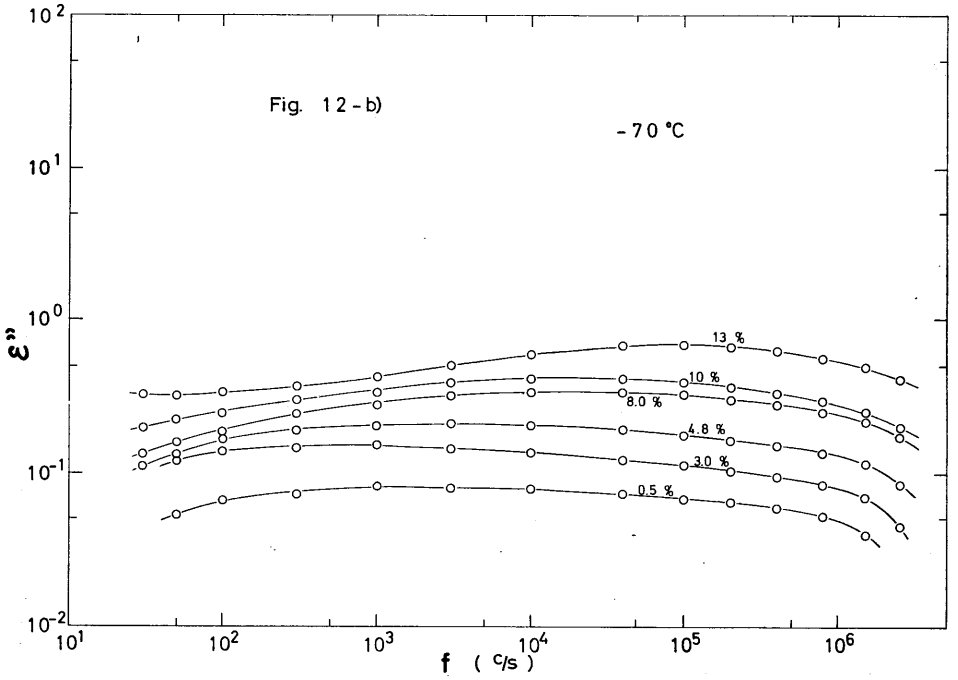


度と周波数によって非常に影響を受け，　いま対象としている周波数の範囲では，　0℃～−50℃ の範囲に温度分散が存在する[20] ために，低い温度範囲では，水を含んだ木材の誘電性でも特異な周波数依存性の挙動が認められるであろうと推定できる．そこで，この研究では −70℃ の低温まで実験を行なっている．まず，温度 −20℃ の場合の ε′ と ε″ の周波数との関係は，Fig. 10 に示すように，u=0.6%においても u=3.0%においても，低周波領域の ε′ は周波数に無関係に一定な値を示し，ε″ の上昇をみないが，u=7.8%にもなると ε′ および ε″ は僅かながら変化する．　すなわち，低い含水率では低周波領域の異常分散が存在しないが，含水率の増加とともに低周波領域の異常分散の存在が顕著となってくる．しかし，θ=0℃ の場合に比べて，θ=−20℃ で低周波領域の ε′ と ε″ は小さな値を示し，結局，温度の降下に伴って界面分極は非常に束縛を受け，分極の程度は小さくなっていることを示す．このことは，さらに温度を降下させて −40℃，−70℃ の場合，す









なわち，Fig. 11 と Fig. 12 で，より一層顕著となっている．$\theta=-40$℃ では，$u=7.5\%$ でも低周波領域の異常分散は認められなくなり，$u=10\%$で僅かながら ε'' が増加しており，はるか超低周波部に異常分散を推定できる． さらに温度が降下して $\theta=-70$℃ のとき，$u=10\%$以下の含水率で低周波領域の異常分散は認められなくなり，$u=13\%$で 100c/s 以下の低周波部に，ε'' の僅かな上昇が現われている．低周波領域の異常分散は，誘電体の導電性に原因する界面分極による分散であると考えられるので，導電体である吸着されている水が，温度の降下に伴って界面での移動を束縛され，分散が認めにくくなると考えられる．温度が低いとき，木材の誘電分散は認めにくくなり，とくに含水率が低いものほど異常分散が現われにくくなる．すなわち，低含水率の木材中に吸着されている水は，木材実質に強固に吸着され元来大きな緩和時間を有しているので，さらに温度降下の影響を受ければ緩和時間はますます大きくなり，遂には界面での分極は不可能に近くなり，異常分

散は認めにくくなるものと考えられる．高周波領域の異常分散は，さらに低温条件の全乾状態でもはっきりと認めることができる．$\theta=-20$℃ $u=0.6$%で $f_m\fallingdotseq200\cdot10^3$c/s $\tau_0\fallingdotseq8.0\cdot10^{-7}$[sec]，$\theta=-40$℃ $u=0.6$% で $f_m\fallingdotseq100\cdot10^3$c/s $\tau_0\fallingdotseq1.6\cdot10^{-6}$[sec]，$\theta=-40$℃ $u=0$%で $f_m\fallingdotseq3\cdot10^3$c/s $\tau_0\fallingdotseq5.3\cdot10^{-5}$[sec] となり，ほとんど全乾に近い状態の場合でも異常分散は明瞭に認められ，温度の降下に伴って異常分散の現われる周波数は低周波側へ，つまり，平均緩和時間 τ_0 は長時間側へ移動したことになる．含水率が高い場合，$\theta=-20$℃ $u=13$%で $f_m\fallingdotseq5\cdot10^6$c/s $\tau_0=3.2\cdot10^{-8}$[sec] であったが，$\theta=-70$℃ $u=13$%で $f_m\fallingdotseq100\cdot10^3$c/s $\tau_0\fallingdotseq1.6\cdot10^{-6}$[sec]となり，温度の降下とともに平均緩和時間 τ_0 は長時間側へ移動する．

双極子回転の緩和時間 τ に関する DEBYE の式[4)21)]は，

$$\tau=\frac{4\cdot\pi\cdot\eta\cdot a^3}{k\cdot T} \qquad \cdots\cdots(3\cdot2)$$

で表わされ，ここで η：粘性係数，a：分子半径，k：BOLTZMANN の常数，T：絶対温度である．いまこの式で，結合水では水の双極子の回転運動に対する抵抗 η は普通の水より大きく，さらに，温度の低下によって η は大きくなり，含水率の低下によって木材実質と水の結合が強固なものほど残り，η は大きくなる．η が大きくなると τ は大きくなり，結局，温度が低くなることと含水率が低下することによって，緩和時間は大きな値をもつようになる.[31)] さらに，全乾状態においても，セルロースはグルコース残基中に 3 個の -OH 基をもち，これに基づく ε'' の極大が期待され，これも温度の低下とともに -OH 基の双極子回転が束縛され，τ は大きくなる筈である.[20)]

木材について得られた低温での平均緩和時間に関しての報告はほとんどないので，高周波部に存在する平均緩和時間 τ_0 のうち，この研究で得られた結果を要約し，その 1 部を Table 2 に掲げる．なお，この研究で得られた低周波領域の異常分散は，大部分が超低周波領域に存在すると考えられ，τ_0 を算出することはできなかった．

Table 2. τ_0

M. C. % / TEMP ℃	0.6	1.0	3	6	7.5	13
40	1.6×10^{-8}		1.6×10^{-8}			
0		3.2×10^{-7}	3.2×10^{-7}	2.1×10^{-7}	8.0×10^{-8}	
−20	8.0×10^{-7}		8.0×10^{-7}		1.1×10^{-7}	3.2×10^{-8}
−40	1.6×10^{-6}	1.6×10^{-6}	1.6×10^{-6}		4.0×10^{-7}	
−70	1.1×10^{-4}		1.1×10^{-4}		8.0×10^{-6}	1.6×10^{-6}

Unit: [sec]

木材の低温における誘電性についての研究はほとんどないが，満洲産の大麦—パラフィン系について，含水率 19.43%，温度−45℃～+10℃，周波数 $6\cdot10^3$c/s 以下で，上田，志方の報告[37)]がある．大麦—パラフィン系でも，tan δ と周波数の関係で tan δ に極大値を認め，その極大値が存在する周波数は，低温になるほど低周波側に移動した．さらに，上田，志方は北満産と南満産の大麦の間に誘電性の差が存在し，測定条件が一定ならば，北満産の大麦は南満産の大麦よりも大きな平均緩和時間 τ_0 をもっていることを明らかにし，大麦の水に対する親和力は，北満産大麦の方が南満産大麦よりも大きいと結論した．

そして，この関係は大麦の耐寒性と結びつくものであるとしている．木材についても，耐寒性の有無はともかくとして，寒地産のものか，暖地産のものかなど生育地の気象条件によって，低周波領域での異常分散の挙動に差異が存在することが考えられるので，Table 2 の値にも，さらに検討の余地があるであろう．

3.3. 結　　論

以上，供試片の温度と含水率を変化させ，木材の ε' と ε'' の周波数依存性を検討し，木材の ε' と ε'' の挙動は低周波の部分と高周波の部分で，まったく異なっていることがわかった．温度と含水率によって，ε' と ε'' の周波数依存性は著しい影響を受けるので，次章以下で，含水率および温度の誘電的挙動への影響を詳述することにして，ここでは周波数による ε' と ε'' への影響についてのみ論じた．

STAMM, A. J.[12)26)27)] が，木材の直流電気伝導度は樹種，比重などよりも含水率によって，とくに繊維飽和点以下では含水率の影響が大きいことを報告している．そして，全乾状態から繊維飽和点までの範囲で含水率が増加すると，電気伝導度は 10^6 倍以上にも達すると述べている．結局，木材の導電性は，全乾状態から繊維飽和点までの範囲では，極度に含水率の影響を受けることを示している．そして，繊維飽和点以下の含水率状態の木材では，木材の実質であるセルロースに吸着されている水は，電界の中に置かれたとき，吸着されている点から引き離すためにある限界電圧—解着電圧—を必要とし，堤・渡辺[35)]は実験によってこのことを確かめている．さらに，木材のような間隙性伝導系に吸着されている水は，緩和時間の分布が存在していると考えられ，これは温度と含水率によって大きな影響を受ける筈である．これらのことは，この研究で得た前述の木材の ε' と ε'' の周波数依存性と，まったく相いれる結果である．

木材の ε' と ε'' の周波数依存性について，次のように要約できる．すなわち，この研究の実験を行なった周波数範囲では，低周波領域と高周波領域の 2 ヶ所で，異常分散が存在することが認められた．低周波領域の異常分散は界面分極に原因すると考えられるので，とくに，木材実質中に存在する水と密接な関係をもち，たとえば，全乾状態では分散が認められず，含水率の増加とともに分散は顕著となってくる．また，低温条件では，分極が束縛されるために，温度の降下に伴って分散が認められにくくなり，平均緩和時間は長時間側へ移動する．高周波領域の異常分散は双極子の配向分極に原因すると考えられ，吸着されている水の配向分極のほかに，木材セルロース中に存在する $-OH$ 基の分極が考えられ，全乾状態においても異常分散は認めることができるための理由となっている．勿論，温度の降下によって双極子の回転が束縛されるので，異常分散は温度の降下とともに認めにくくなるとともに，平均緩和時間は長時間側へ移動する．

4. 木材の誘電率 ε' と誘電損率 ε'' の含水率依存性

4.1. 目　　的

木材の物理的，あるいは力学的性質のいずれにおいても，その挙動は木材実質中に存在する水と密接な関係をもっているので，木材の含水率と諸性質の間の関係は多くの研究者達によって，多年にわたって研究されてきた．特に，繊維飽和点以下の含水率は，木材の

物理的，あるいは力学的性質と密接な関係をもち，木材の電気的性質においてもその例外ではない．

STAMM, A. J.[26] は木材の含水率と直流電気伝導度の対数の間に，$u=7\sim30\%$の範囲で，直線関係が存在すると云う HASSELBLATT の実験結果を確認し，繊維飽和点以上で，電気伝導度は含水率と直線関係にあることを報告している．WALKER, A. C.[9] は木棉の直流電気伝導度と含水率の関係として，次の3つのことを指摘している．すなわち，①3～6%以下の含水率では，電気伝導度の対数と含水率の間には直線関係が認められ，②6～10%の範囲では，電気伝導度の対数と含水率の対数の間に直線関係が認められ，③10～23%の範囲で，電気伝導度と関係湿度の間に直線関係が認められると報告している．BRIGGS, D. R.[9] は蒸溜水を用いて，セルロースの表面直流電気伝導度を求めると，自由水の電気伝導度の約10倍にも達することを認め，これは水分子が配向し，そして，自由水の状態で占めているよりも小さい体積に圧縮されるセルロース—水系に加わる力によるものだと報告している．結局，木材の直流電気伝導度は，吸着されている水の状態と密接な関係をもつことがわかる．MURPHY, E. J.–WALKER, A. C.[17] は，繊維物質の直流電気伝導度は伝導性を示す水が存在する通路の断面積に比例し，伝導度の変動はこの通路の不規則性に原因すると述べている．すでに1930年頃に，このような研究結果が報告され，セルロース質繊維によって構成されている木材の直流電気抵抗について，他のセルロース繊維である木棉，麻などとともに検討が行なわれ，その後，多くの研究者達によって含水率と，木材の直流電気伝導度，あるいは直流電気抵抗の関係が論じられ，現在ではすでに，直流抵抗式木材含水率計として実用にも供されている．しかるに，木材のような間隙性伝導系の物質を直流電界の中におくとき，表面電流を考えに入れなくても，まず電圧印加と同時に比較的大きな充電々流が流れ，これに続いて時間の経過とともに減少しながら一定値に近づく吸収電流が流れ，そのあと一定な電流—漏れ電流—が流れるようになり，その機構は非常に複雑であり，未知の分野を多く含んでいる．吸収電流は双子分極，イオン分極，界面分極などの誘電分極に基づくものであるとされ，さらに，印加電圧が比較的低いときには，漏れ電流はオームの法則にしたがい，時間に対して一定であるが，電圧が高くなると，電圧に対して非直線的に急増するし，また電圧が一定でも時間とともに増加することがあると云われている．そして，漏れ電流は温度の影響を著しく受けるので，イオン伝導によるものが大部分であると考えられている．[16] さて，前章において結論したように，30c/s～$2.5\cdot10^6$c/s の周波数範囲で，木材の誘電分極には界面分極と双極子の配向分極を認めており，直流電界の中に木材を置くとき考えられる吸収電流を無視することはできない．そして，堤・渡辺[35]は木材に直流電圧を印加したとき，木材実質中に水が存在する状態で，電圧の変化とともに比抵抗が変化することを認め，また，吸収電流は数時間にも及ぶことを認めている．結局，吸着イオンをミセルから引き離すに必要な解着電圧の存在と，吸着イオン層はそれぞれ異なる緩和時間をもつことのために，木材を交番電界中におき，誘電的挙動でもって木材の電気的性質を検討することが是非必要である．

さて，従来報告されている木材の誘電的性質は，前章でも述べたように，狭い周波数範囲，そして高周波領域におけるものがおもであった．この研究では，周波数範囲を広げ，30c/s～$2.5\cdot10^6$c/s の範囲で周波数を変化させるとき，木材の ε' と ε'' への含水率の影響を検討することによって，木材へ吸着されている水の挙動について論及する．

4.2. 実験結果と考察

Fig. 13 は温度が 40℃ における ε' および ε'' と含水率の関係を，特に 10^2c/s, 10^3c/s, $10\cdot10^3$c/s, $100\cdot10^3$c/s, $1.5\cdot10^6$c/s の5つの周波数についてのみピック・アップし，それぞれの周波数ごとに図示している．すでに多くの研究者達[7)9)23)24)25)33)39)]によって，木材の含水率と ε' の関係は多数発表されているが，いずれも高い周波数領域での ε' と tan δ の実験結果のみなので，Fig. 13 の低周波における実験結果，さらに ε'' に関する実験結果について，特に検討を行なう価値があるものと考えられる．Fig. 13 からわかるように，含水率の増加に伴って ε' および ε'' は増加の傾向にあるが，ある含水率を境にして ε' および ε'' の増加は急激に顕著となる．そして，この ε' と ε'' の値の急激な増加は，低周波における程，低い含水率で認められるようになる．これは，低い周波数の交番電界は，含水率が低いときでも吸着イオンの移動や双極子の回転による配向分極が起るに十分な電界の変化であるが，周波数の上昇とともに，イオンの移動や分極が電界の変化に追従できなくなることに原因すると考えられる．結局，高周波で ε' や ε'' の値が増加するには，小さい吸着力でもって木材セルロース鎖に吸着されている緩和時間が小さい水が多く存在する状態，すなわち，高含水率の状態が必要である．換言すれば，低周波数の電界中におけるもの程，含水率に対する ε' と ε'' の挙動の顕著な変化は低含水率においても認められることになり，この含水率を境にして低含水率側で，ε' あるいは ε'' と含水率の関係はほとんど平坦な曲線で示されることになる．温度 40℃ の場合，$f=1.5\cdot10^6$c/s では $u\fallingdotseq8\%$以上になると ε'' の急激な増加を認め，周波数の低下に伴って，順次，低い含水率で ε'' の急激な増加が現われ，$f=100$c/s では $u\fallingdotseq2\%$で，含水率の増加に伴う顕著な ε'' の増加を認めるようになる．Trapp, W.-Pungs, L.[34)] は Fichte 材について，温度 20℃ で tan δと含水率の関係を求め，$f=10^3$c/s では $u\fallingdotseq4\%$ で，$f=100\cdot10^3$c/s では $u\fallingdotseq9\%$ で，$f=10\cdot10^6$c/s では $u\fallingdotseq20\%$で急激な tan δ の挙動の変化を認めるようになったことを報告している．この Trapp, W.-Pungs, L. の研究は，測定方法と得られた結果の表示にいささか疑問の点があり，さらに tan δ の結果によっていることを考慮に入れても，この研究で得た結果と良く一致していると云える．上村[39)] は $f=10^6$c/s の実験結果で，$u\fallingdotseq6\%$を境として低含水率側と高含水率側では，ε' と含水率の間の挙動が異なることを報告し，竹田[32)] は $200\cdot10^3$c/s～$20\cdot10^6$c/s の周波数範囲にわたる実験で，$u\fallingdotseq5\%$附近で ε' の含水率との関係は著しく異なると報告している．そして，上村および竹田はそれぞれ，この理由を木材へ水が吸着する場合の分子層，および水の電波に対する異常分散にもとめている．Hearmon, R. F. S.-Burcham, J. N.[7)] は tan δ と含水率の間の関係を求め，10^6c/s の場合には $u\fallingdotseq10\%$以上で tan δ は急激に増加するが，$10\cdot10^6$c/s と $100\cdot10^6$c/s では，それぞれ $u\fallingdotseq6\%$と $u\fallingdotseq10\%$で tan δ の極大値が存在し，tan δ の極大値が認められる位置からさらに含水率が増加するとともに，tan δ は一旦減少し，その後，再び増加する傾向を認めている．この理由について，Hearmon, R. F. S.-Burcham, J. N. は何もふれていないが，含水率の増減とともに，木材セルロースへ吸着された水の緩和時間が異なり，測定に用いた周波数によって誘電吸収に差異を生ずることによると考えることができる．Venkateswaran, A.-Tiwari, Shiva Yogi[40)] はインド産材の数樹種について，ε' と tan δ を求め，含水率の増加とともに ε' はなだらかな曲線をもって増加することを認め，tan δ

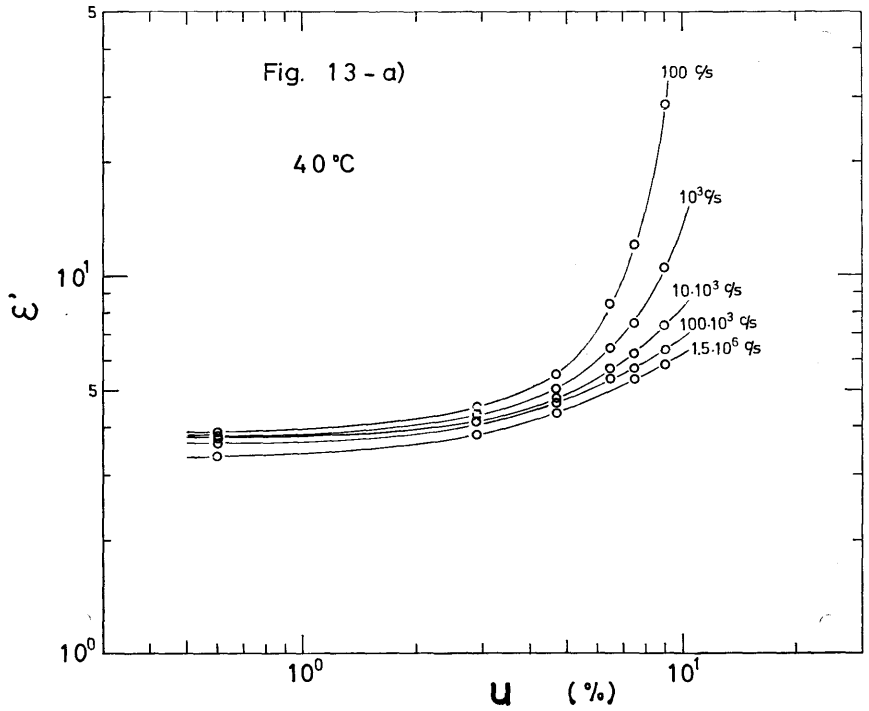


Fig. 13 - a)
40 °C
100 c/s
10³c/s
10·10³ c/s
100·10³ c/s
1.5·10⁶ c/s
ε'
u (%)

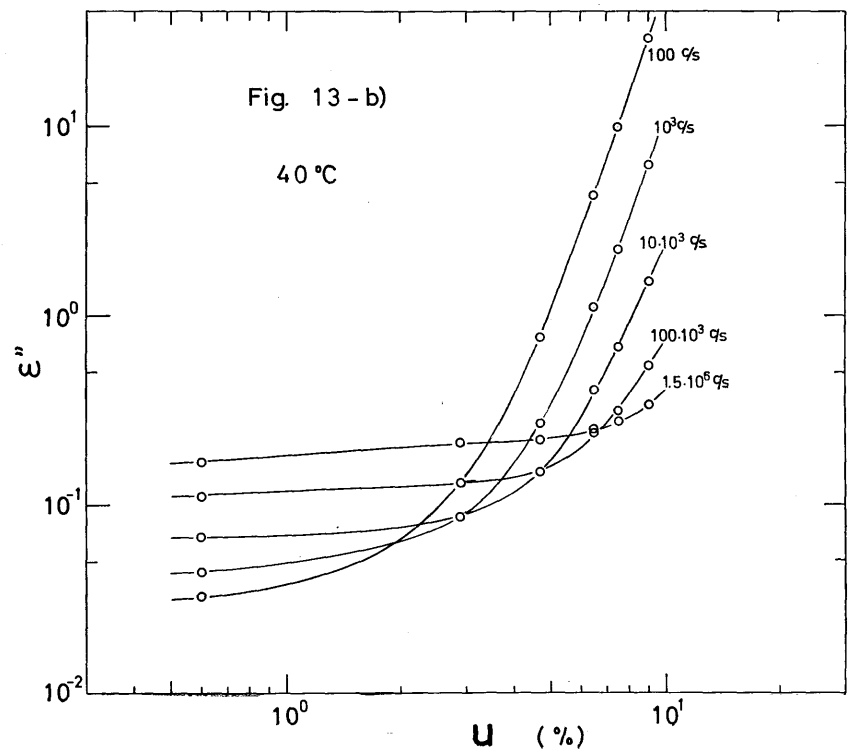


Fig. 13 - b)
40 °C
100 c/s
10³c/s
10·10³ c/s
100·10³ c/s
1.5·10⁶ c/s
ε''
u (%)

は $10\cdot10^3$c/s では含水率 5 %附近に極大値をもつことを報告している．得られた結果の取りまとめに疑問も残っていると考えられるが，彼等は $\tan\delta$ の極大値と極小値は，緩和時間の極大値と極小値に関係があると述べている．さらに，Fig. 13 の ε' と含水率の関係で，$100\cdot10^3$c/s と $1.5\cdot10^6$c/s の間には，100c/s，10^3c/s，$10\cdot10^3$c/s の間で認められるような，含水率の増加に伴って認められるようになるそれぞれの曲線の間の間隔の広がりが存在しない．このことは，前章の ε' と ε'' の周波数依存性で論じたように，高周波領域では双極子の回転による分極に原因する分散に影響を受けるが，低周波領域では界面分極に原因する分散の影響を受けており，結局，両者が異なった分散の影響のもとにあることに理由づけられる．そして，界面分極は高含水率における ε' へ，理由を考えれば当然のことながら，特に顕著な影響を与えることをグラフ上に示していることにほかならない．

以上を要約すれば，いかなる周波数の電界の中に木材を置いても，十分に低い含水率では，それぞれの周波数ごとに一定の分極を示すのみで，誘電的な損失にも著しい変化がないが，ある含水率以上になると急に分極が活発となり，分散が認められるようになり，誘電的な損失も同時に急増することになる．すなわち，含水率の増加とともに，吸着されている力が小さい状態の“水”が多量にセルロース上に存在することになり，電界の変化の影響を受けやすい状態，換言すれば，小さな緩和時間をもっている状態の水が，電界の変化に伴って分極を起こし，誘電分散を認めるようになり，それとともに誘電的な損失を伴ない，ε' と ε'' の急激な増加をきたすことになる．木材を交番電界の中におくとき，吸着されている水のうち緩和時間が大きいものは，低い周波数でのみ分極を起こし得るが，高い周波数では追従できない．そして，緩和時間が小さければ小さい程，高い周波数にも追従が可能になるので，Fig. 13 に示すように，周波数が高いものほど高い含水率に，ε' と ε'' の挙動が急変する位置をもつようになる．さらに，さきに述べた周波数依存性の検討の際に認められた界面分極に原因する分散の影響は，高い含水率領域で特に顕著に認められるので，ε' と含水率の関係を表わす曲線の上で，含水率の増加とともに影響が現われてくることになる．

Debye の双極子回転の緩和時間 τ に関する式（(3·2) 式）で，絶対温度 T が大きくなると τ は小さくなり，さらに，木材の導電性も温度の変化によって影響を受け，温度の上昇は導電性を向上させることがわかっているので，[3)11)] ε' と ε'' の含水率依存性は温度によって著しい影響を受ける筈である．

Fig. 14 は，温度 60℃ で求めた ε' および ε'' と含水率の関係であり，ε' および ε'' が急激に異なった挙動を示すようになる含水率が，Fig. 13 に比較して，僅かながら低含水率側へ移動していることが認められる．なお，測定中に供試片から水分が蒸発し，測定中に含水率が低下するので，十分に精度を期待する測定を高含水率で行なうことが不可能であったので，$u\fallingdotseq5.5$% 以上で得られた測定結果は図中に示されていない．そこで，$u\fallingdotseq8$% で得られた参考値をもとにして，高含水率におけるカーブを与えている．そのために，温度 40℃ の場合に行なったように，広い含水率範囲にわたって詳細な検討を行なうことはできないが，つぎに述べるようなことは言えるであろう．温度 60℃ の交番電界中に木材を置くとき，周波数 100c/s では含水率約 1 %以下に，ε'' が著しく挙動を異にするようになる含水率の位置が現われ，順次周波数の増加とともに，その位置は高含水率側へ移動し，$100\cdot10^3$c/s では含水率約 4 %を境にして ε'' の挙動が異なるようである．Fig. 13

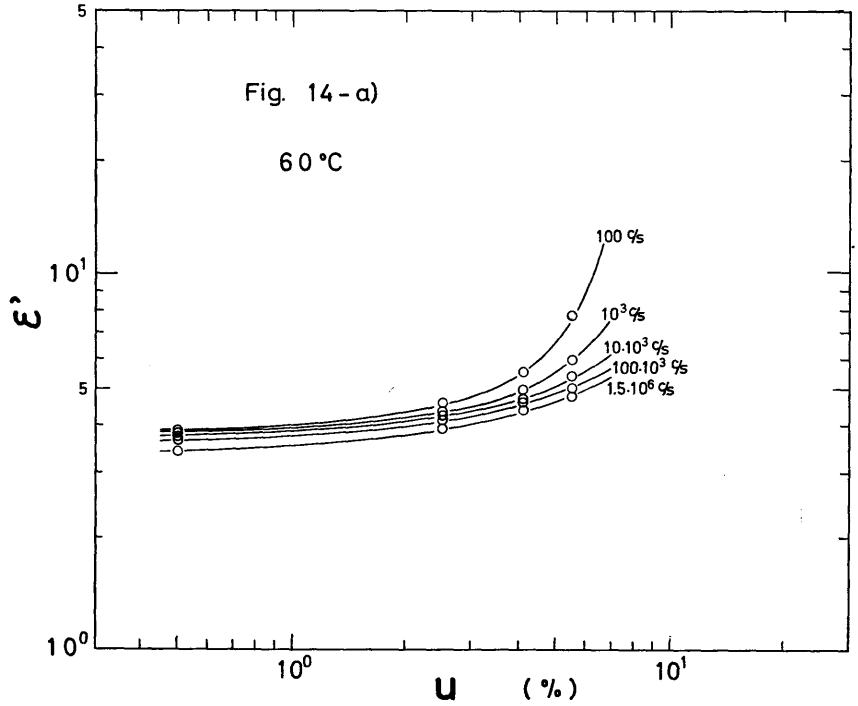


Fig. 14 - a)
60 °C
100 %s
10³ %s
10·10³ %s
100·10³ %s
1.5·10⁶ %s
ε'
u (%)

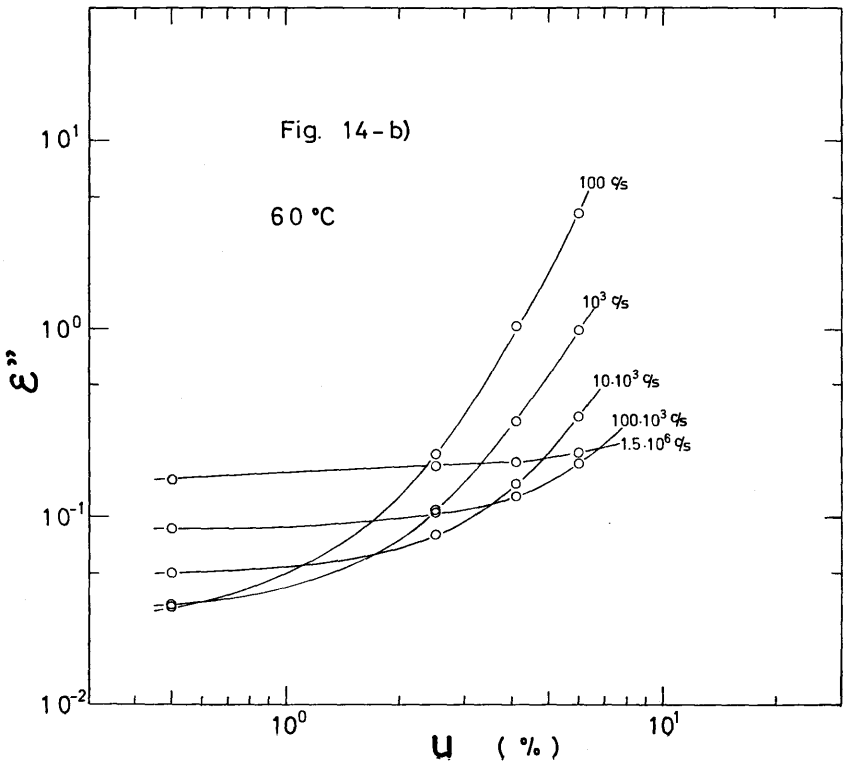


Fig. 14 - b)
60 °C
100 %s
10³ %s
10·10³ %s
100·10³ %s
1.5·10⁶ %s
ε''
u (%)

($\theta=40$℃) と比較して，誘電的な挙動が異なるようになる含水率の位置は，明らかに低含水率側へ移動していることを認め，これは温度上昇に伴って，吸着されている水イオン，あるいは極性基の運動が活発となり，緩和時間の減少をきたし，低含水率でも高い周波数の電界の変動に追従できるようになったためと考えられる．また，Fig. 14 においても，高い含水率の領域で，含水率の増加に伴うそれぞれの周波数の曲線の間隔の広がりを，高い周波数の曲線については Fig. 13 と同じように認めることができなかった．低い温度条件の中にある木材は，温度が高い時と全く逆の理由によって，吸着イオン，あるいは極性基が束縛されることになり，吸着イオンの移動，双極子の回転が困難となって，誘電性に負の影響を与える筈である．

Fig. 15 は温度 0℃ で得た ε' と ε'' の含水率に対しての関係である．温度が降下したために，それぞれの周波数における曲線は，高温で得た曲線を右側へ移動したような位置関係となる．そして，ε' あるいは ε'' が挙動を異にするようになる含水率の境が，100c/s で約 3 %，順次周波数の増加とともに高含水率側へ移動し，$f=100\cdot10^3$c/s で $u\fallingdotseq8$%附近に位置することが認められた．さらに，$100\cdot10^3$c/s と $1.5\cdot10^6$c/s で得られた ε'' と含水率の関係は，低い含水率範囲で曲線が重なり合うような傾向である．Fig. 13, Fig. 14 で指摘した高周波領域の測定で認められるところの，高い含水率領域における ε' と含水率の関係を表わす曲線間の広がりは，Fig. 15 でより一層重要となる．すなわち，温度 0℃ では $10\cdot10^3$c/s, $100\cdot10^3$c/s, $1.5\cdot10^6$c/s の曲線の間に，広い含水率範囲にわたって，終始それぞれの曲線間の隔たりがほとんど一定であり，このことは，温度−20℃, −40℃, および −70℃ で得られた結果，Fig. 16, Fig. 17, および Fig. 18 で一層顕著である．そして，いずれの周波数の曲線についても，ε' の値が急勾配で上昇するようになる含水率は 1 つの温度条件の中ではほとんど変わらず，含水率と無関係であることを示している．なお，ε'' の含水率との関係を表わす曲線は，それぞれの周波数で得られたものがグラフ上で重なり合い，結局，Fig. 15 の $100\cdot10^3$c/s と $1.5\cdot10^6$c/s の間で認められる位置関係は，温度の降下とともに低周波側へ広がったことになる．木材セルロースへ吸着されている吸着イオンは，温度の低下によって吸着点に固着され，誘電的な現象に寄与できるのは双極子の回転による配向分極のみとなり，含水率の上昇に伴って急に顕著となる吸着イオンの分極，あるいは不均質構造のイオンの移動による影響がなくなることに，その原因を求めることができるであろう．前章の ε' および ε'' と周波数の関係で，低い温度条件の電場の中にある木材は，低周波領域における分散を認めにくくなり，その原因として界面分極に原因する誘電分散を考えたが，そのことと，ここで得た推論とはあいいれるものである．

同じ周波数の電界中に木材があるとき，その ε' への温度の影響を検討するために，周波数 100c/s で得た結果を Fig. 19 に，$100\cdot10^3$c/s で得た結果を Fig. 20 に示している．Fig. 19 から，ε' が急勾配で増加するようになる含水率は，温度が低下するに伴って高含水率側へ移動する．しかし，$\theta=-40$℃ と $\theta=-70$℃ の曲線の間には，その傾向が認めにくくなっている．さらに，$f=100\cdot10^3$c/s で得られた Fig. 20 においては，$\theta=40$℃ と $\theta=-70$℃ の曲線の間に，著しい差を認めない．すなわち，界面分極に原因する分散が支配的であると推定できる 100c/s では，温度が約 −20℃〜−40℃ よりも高温で，吸着イオンは界面分極にあずかり得るが，より低い温度では，吸着されている水分子は全く“凍

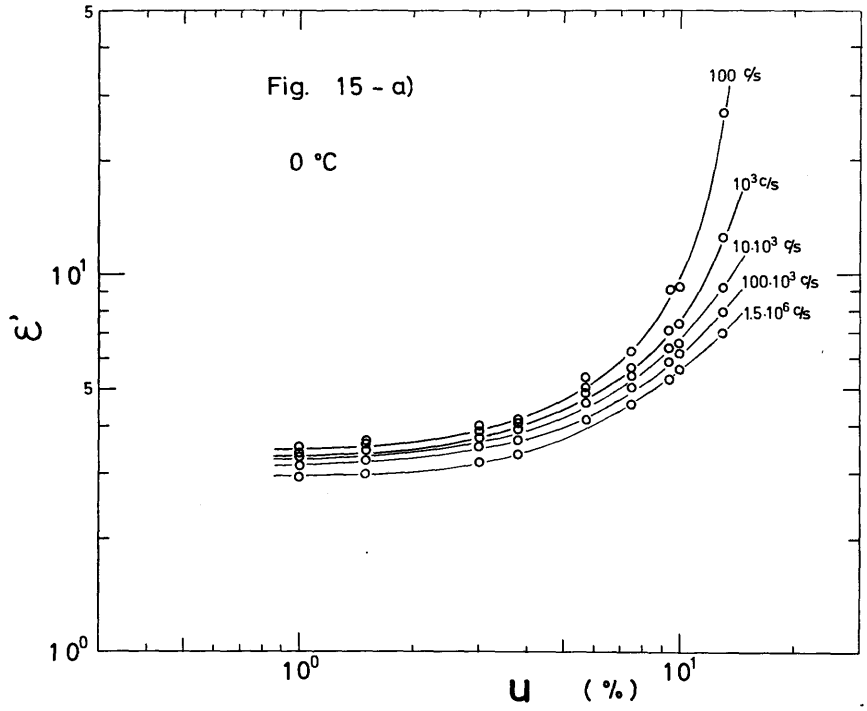


Fig. 15 - a)
0 °C
100 c/s
10³ c/s
10·10³ c/s
100·10³ c/s
1.5·10⁶ c/s
ε'
u (%)

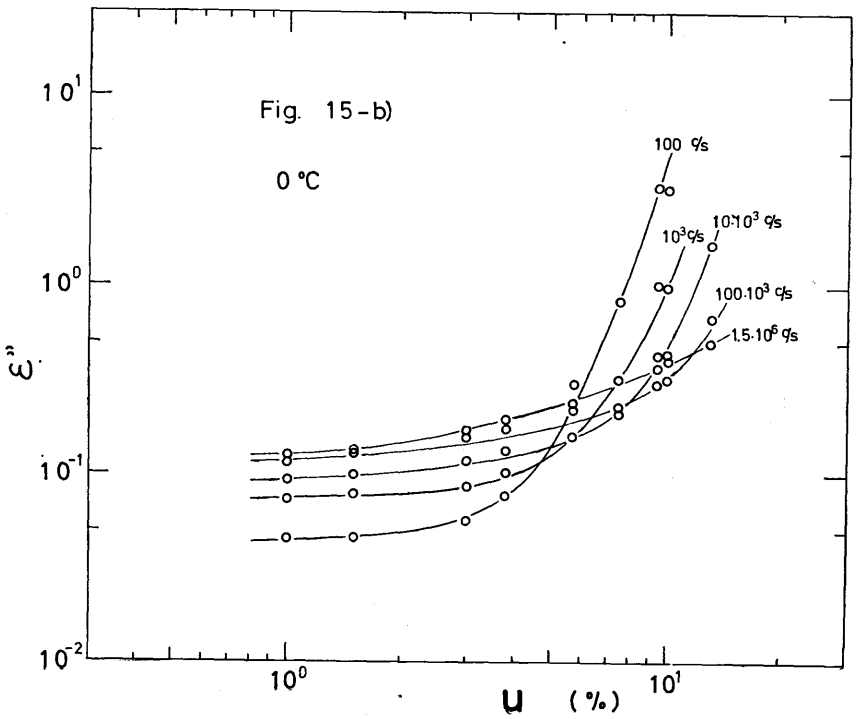
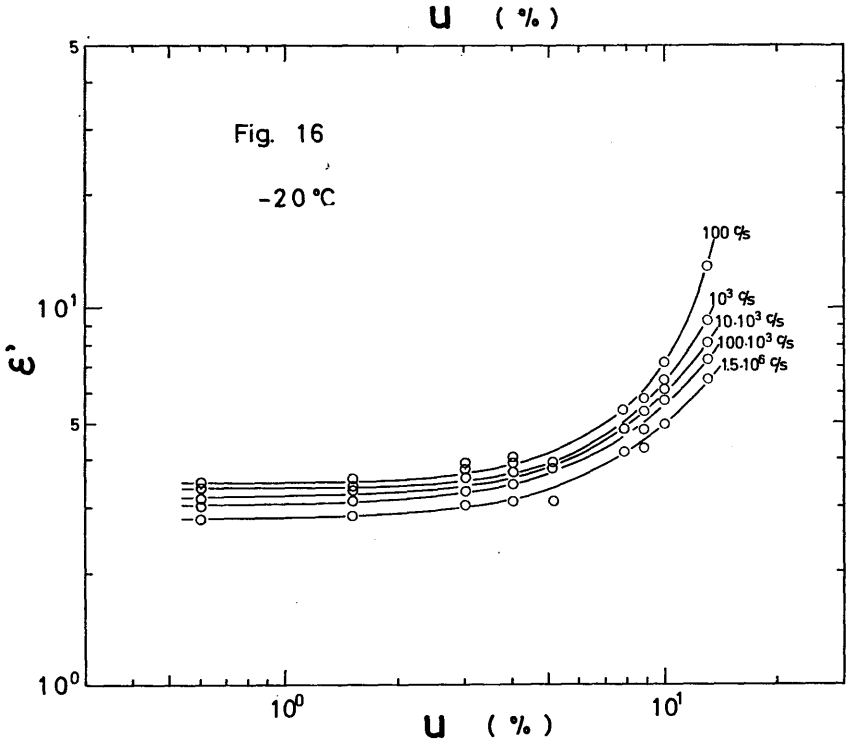
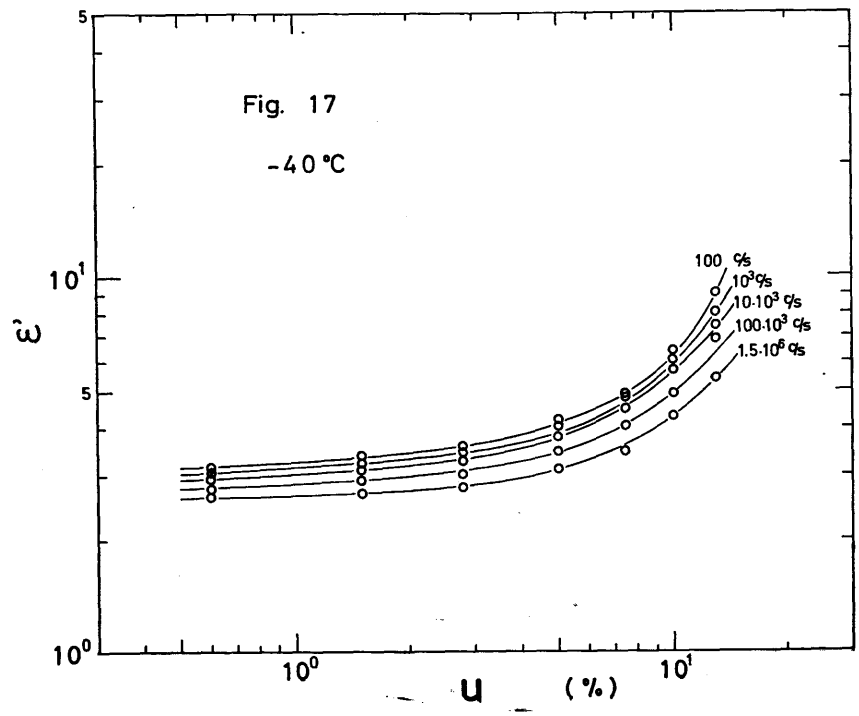
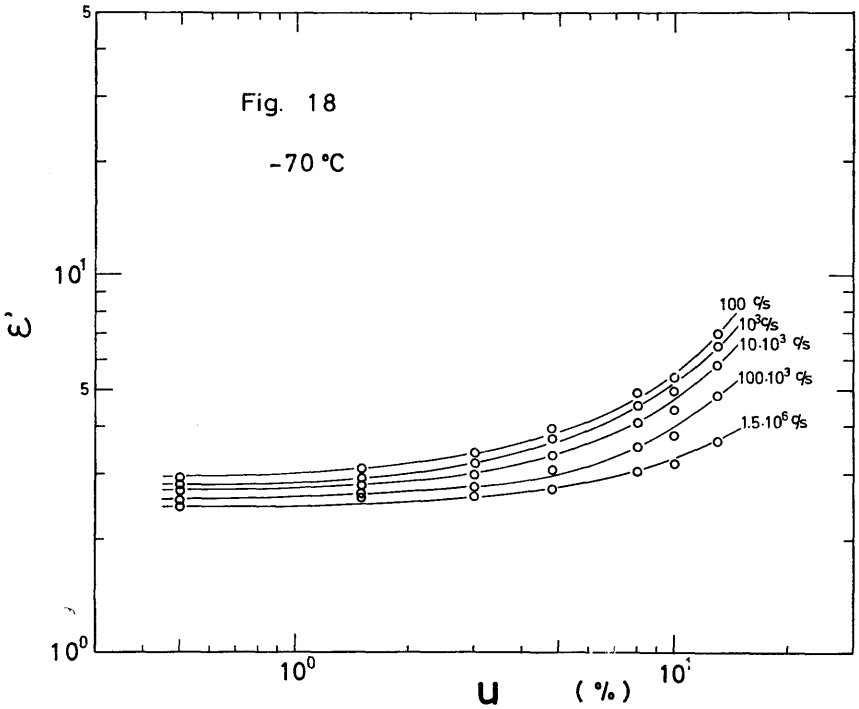


Fig. 15 - b)
0 °C
100 c/s
10³ c/s
10·10³ c/s
100·10³ c/s
1.5·10⁶ c/s
ε''
u (%)


u (%)
5
Fig. 16
-20 °C
100 c/s
10³ c/s
10·10³ c/s
100·10³ c/s
1.5·10⁶ c/s
10¹
ε'
5
10⁰
10⁰
10¹
u (%)


5
Fig. 17
-40 °C
100 c/s
10³ c/s
10·10³ c/s
100·10³ c/s
1.5·10⁶ c/s
10¹
ε'
5
10⁰
10⁰
10¹
u (%)



結" され，界面分極にあずかることが不可能となる．そして，低温度では双極子の配向分極による分散のみが存在することになり，それぞれの曲線は全く類似の挙動を示すことになる．前章で述べたように，$f=100\cdot10^3$c/s ではすでに双極子の配向分極による分散が支配しており，温度 40℃～−70℃ の間では，それぞれ曲線の挙動の間に顕著な差を認めないものと考えることができる．これらのことから，界面分極に原因する分散は，含水率による影響の程度が温度とともに大きく変化し，双極子の分極に原因する分散は，含水率による影響の程度が，温度によって大きく変化しないことがわかる．

さて，ここまで述べてくるに当たって，木材の誘電的な現象を界面分極に由来する分散，双極子の回転に由来する分散の2つに分け，電界の変化を中心にして検討を行なってきた．しかし，誘電的な現象の機構から出発して定性的に分析し，この研究で得られた結果を，木材に吸着されている水と関連して検討してみる必要がある．

木材の誘電的な挙動を支配する機構として，次のようなことが考えられる．

a) 不均質構造におけるイオンの移動によるもので，誘電体が誘電率および伝導率に関して不均質な部分から成り立っているとき，自由イオンの移動によって誘電損失が現われる．つまり，MAXWELL-WAGNER の不均質誘電体の理論によって説明されるものであり，界面分極がその役割りを演じている．

b) 不均質誘電体によく似ているが，木材のようなミセル間隙をもつ吸湿性誘電体においては，ミセルの表面に吸着されたイオンが被膜を形成し，電場を加えると被膜内における電荷の移動によって分極を生じる可能性がある．このような吸着イオン層は，ミセル表

面からの距離に応じて一定の緩和時間をもち，MAXWELL-WAGNER の効果に類似の緩和現象を呈する．それぞれの吸着イオン層の分極の差は，ε' と ε'' の値が著しく増加するようになる含水率が，周波数と関係をもっていることの原因をなしており，Fig. 13～Fig 15 は，これによって説明できる．吸着イオン層は温度の変化に伴って緩和時間に影響をうけ，低温になるほど高周波の電界の変化には追従できなくなり，Fig. 13～Fig. 18 の ε' ある

Fig. 19

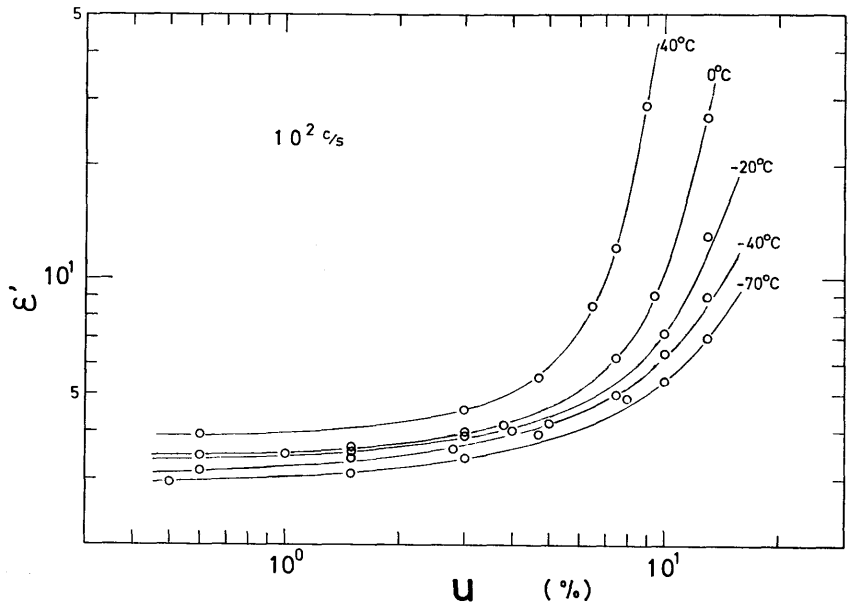
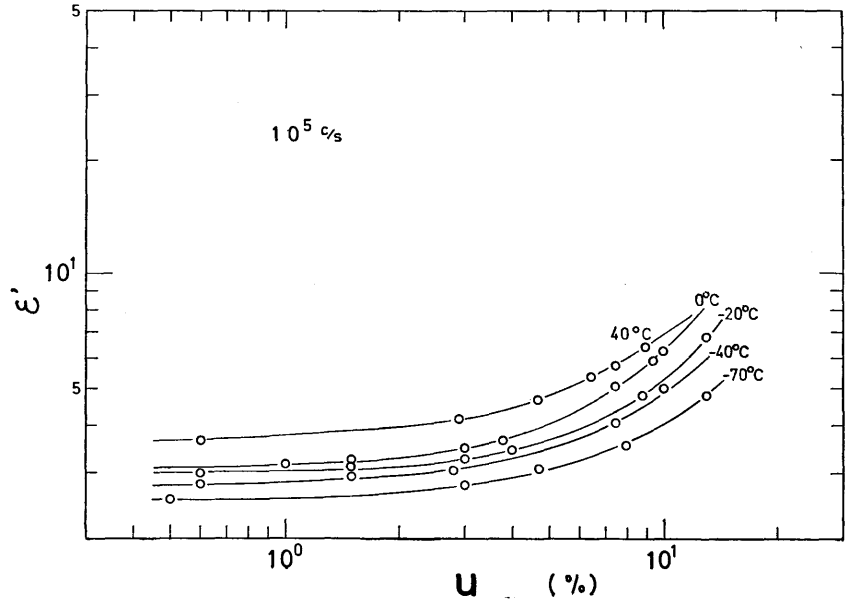


Fig. 20



いは ε'' への温度の影響の原因となる．

c) 分子が双極子を含む場合には，それが電場方向に回転するのに抵抗を受けるので，配向分極に遅れを生じ緩和現象を示す．木材の実質を構成するセルロースは，各グルコース残基中に3個の -OH 基を持ち，これが木材の吸湿性のもとをなしており，繊維飽和点以下の範囲では，吸着されている水分子は a)，b) 項で述べた不均質理論によって説明される分散，あるいは吸着イオンに原因する分散に役割りを演じていることは勿論である．それとともに，水分子自身の双極子が電場の中で回転し，これに基づく誘電的現象も期待できる筈である．つまり，低周波領域での分散には吸着されている水分子の存在が是非必要であるが，高周波で認められる誘電分散には水分子の双極子のほかに，木材セルロースのグルコース残基中の -OH 基の双極子の回転に原因する分散も期待でき，高周波領域での分散には，水分子の存在が必ずしも必要ではない．木材と同じくセルロースで構成されているセロハンについての研究結果が，STOOPS (1934) によって報告されている.[20] すなわち，乾燥したセロハンで，周波数 (60c/s～10^6c/s) と $\tan\delta$ の関係で，低周波領域では $\tan\delta$ の増加を認め得ないが，高周波領域で $\tan\delta$ の極大値の存在が認められている．勿論，このセロハンは十分に乾燥され，かつグリセリンを含んでいないものである．結局，この研究と STOOPS のセロハンについての結果を考えあわせると，周波数が高い交番電界の中に置かれた木材は，吸着された水を持たなくても，双極子の回転に原因する分極の影響をもつことになる．

d) 上述の3つの機構が，特に吸着された水をもっている木材の誘電性の機構を説明するのに重要であるが，さらに含有水分中に不純物電解質がとけて電解質溶液を形成し，イオン伝導による直流損失を生じることのほかに，DEBYE-FALKENHAGEN 効果として知られる電解質溶液特有の誘電損失を生じる．しかし，陽子の転位，空孔双極子の配向などとともに，ここではこれの影響は無視できるものと考えられる．

黒崎[14)15)] は無機高分子物質であるシリカゲルが，水を吸着している場合の ε' と ε'' について検討を加え，吸水量の増加につれて ε' が3段の変化を呈することを見出している．すなわち，第1段では吸湿シリカゲルの見掛けの ε'' は0で，水はほとんど OH 双極子回転の自由度を持たず，固体ゲル表面にとらえられた状態．第2段では，ε'' は低周波になるにつれて単調に増大し，BRAKE-SCHÜTZE (1935) が木材の吸着水について見出したと同様に，数 10c/s に至っても ε'' は大きくなる一方であり，この状態では吸着された水分子の相互作用は少なく，かつ，それぞれの分子の双極子回転の自由度もまちまちで，緩和時間は広い範囲に分布している．第3の段階では，吸着水を毛管凝縮水と考える場合と，あるいは一定の双極子回転の緩和時間をもった束縛水と考える場合の，2つの立場のいずれも容認できるとしている．しかし，毛管凝縮状態としても，液態の水とかなり異なった状態であろうと推定している．

SKAAR, C.[25)] は，木材のセルロース部分に存在する水は3つの形態，すなわち，①構造水，②表面結合水，③毛管凝縮水として存在するとし，含水率約 3～10%の範囲が表面結合水の状態であるとしている．TRAPP, W.-PUNGS, L.[34)] は木材セルロース中の水を，①全乾と含水率 5%の範囲，②含水率 5～20%の範囲—吸着の範囲，③毛管凝縮水の範囲に3区分し，誘電性の挙動とよく一致していると報告している．上村,[39)] VENKATESWARAN, A.-TIWARI, SHIVA YOGI[40)] 等も，木材セルロースに吸着されている水の状態の分析はとも

かくとして，含水率と吸着の状態の間には，数段階の差が存在することを認めている．

4.3. 結　　論

この章では，測定を行なった周波数のうち 100c/s，10^3c/s，$10\cdot10^3$c/s，$100\cdot10^3$c/s，$1.5\cdot10^6$c/s のそれぞれで，含水率と ε'，あるいは ε'' の間の関係を検討することによって，交番電界の変化に対する分極の追従が可能であるか否かを中心に論じ，ついで誘電的な現象の機構を吸着イオンの移動と双極子の回転を中心として，定性的に分析した．そして，木材供試片がおかれている電界の変化に対する分極の追従を考慮するとき，木材の誘電性は周波数に非常に顕著な影響を受け，低周波領域での吸着イオンの移動によるものと，高周波領域での配向分極によるものが存在し，前者は吸着水が存在することが必要であるが，後者は全乾状態の木材についても起こり得る挙動であることが判った．このことを誘電的な機構とあわせて検討すると，次のようなことが言えるであろう．

1)　木材セルロースには，水が全く吸着されていないか，あるいは吸着された水が存在しても，その量は僅かで，かつセルロース鎖に近く強く束縛された状態をまず考えることができる．この状態では，電界の変化が如何に緩慢でも，ほんの僅か吸着されている水イオンの移動は全く不可能で，ただ，水分子の双極子の回転による配向分極と，セルロース鎖中に存在するグルコース残基中の -OH 基の配向分極のみが可能である．結局，高周波領域でのみ損失が存在し，それとともに，低含水率部での ε' と ε'' の挙動は，含水率に対して平坦なカーブで表示されることになる．

2)　含水率が増加するにともなって，セルロース鎖へ水分子が吸着されている点は増加し，ついにはセルロース鎖へ吸着されている水分子への吸着も可能となる．この段階では吸着されている水分子相互間の束縛も存在する状態であり，この状態では水—セルロース系よりも緩和時間は小さい筈である．換言すれば，各吸着層ごとに緩和時間の差が考えられ，電界の中にこの状態の木材を挿入するとき，セルロース鎖の表面から遠くに水が吸着されている木材，すなわち，小さい緩和時間の吸着水をもの高い含水率の木材では，高周波でも水分子の双極子の回転による配向分極が可能である．そして，ε' および ε'' と含水率についての曲線は，ある含水率を境にしてその挙動を異にするようになる．つまり，含水率から水の吸着層の緩和時間が推定できるであろう．なお，この段階で，吸着されている水はやはり自由水とは異なった束縛状態にあり，吸着ミセル表面からの隔たりはあると言っても，まだ木材セルロースの吸着力の影響のもとにあると考えられるが，吸着イオンの移動による分散も，少しは認められるであろう．

3)　不均質構造における，イオンの移動による MAXWELL-WAGNER の不均質誘導体の理論に従うものと，木材のような間隙性伝導系のミセル表面の吸着層の電荷の移動などは直流伝導によるものであるので，低い周波数領域で認められる．この状態は 2) 項の場合と交さくして存在すると考えられる．

5.　木材の誘電率 ε' と誘電損率 ε'' の温度依存性

5.1. 目　　的

第3章および第4章において，木材の誘電率 ε' と誘電損率 ε'' はその周波数依存性と

Fig. 21

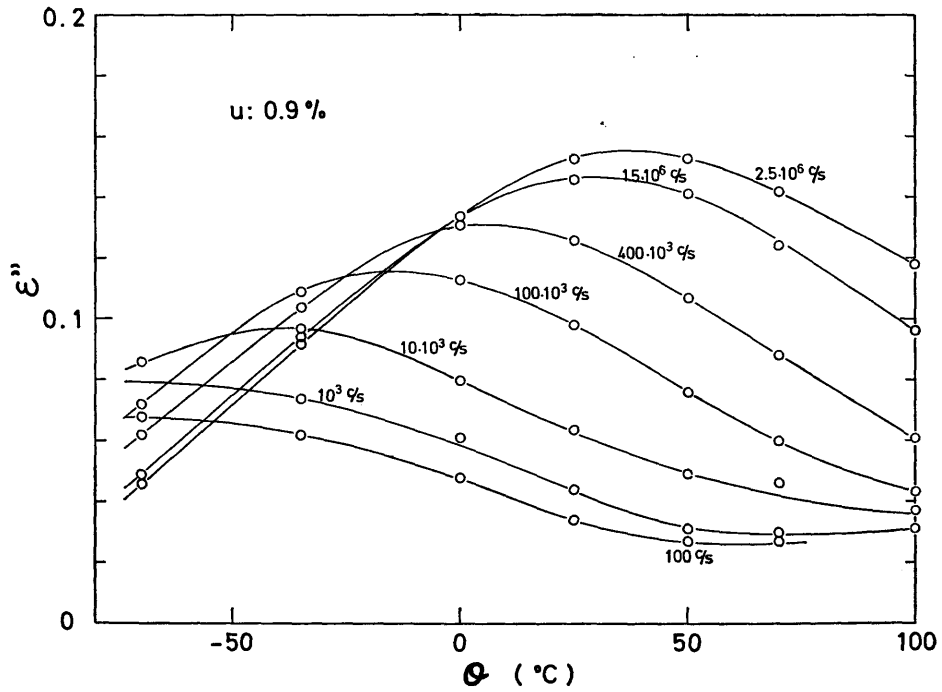
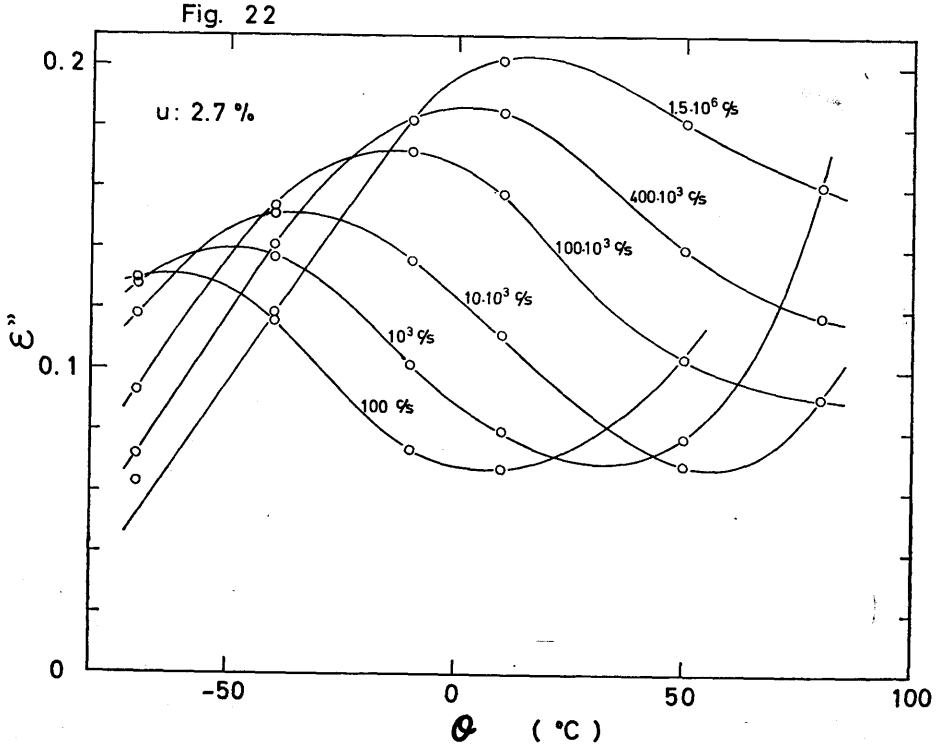
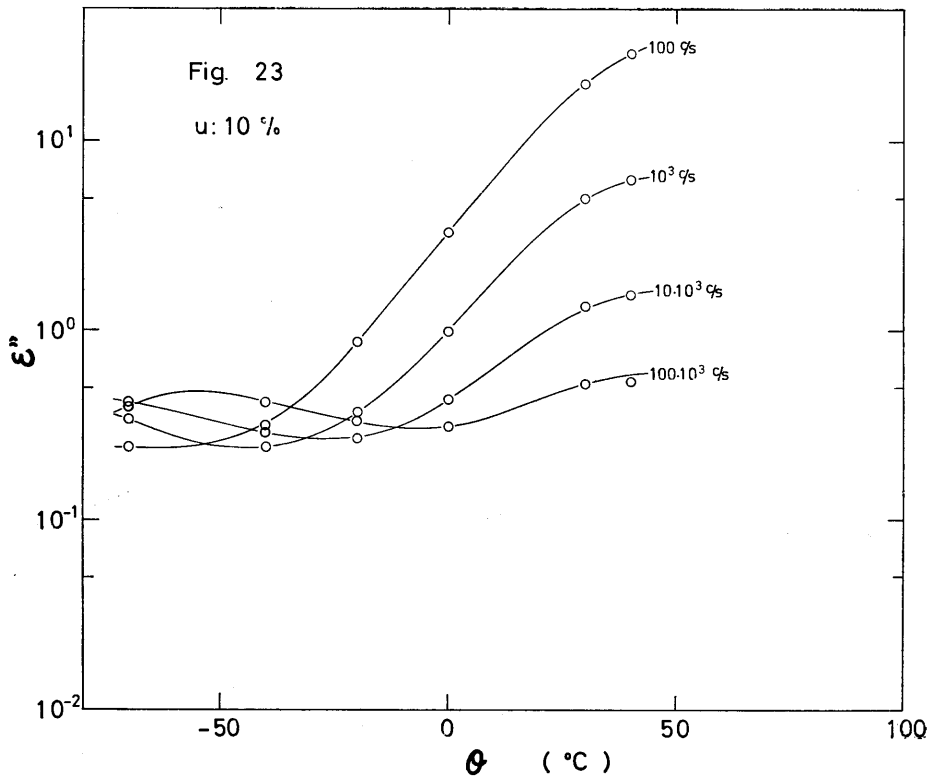

0.2
0.1
0
ε''
u: 0.9 %
1.5·10^6 g/s
2.5·10^6 g/s
400·10^3 g/s
100·10^3 g/s
10·10^3 g/s
10^3 g/s
100 g/s
-50
0
50
100
ϑ (°C)

Fig. 22


0.2
0.1
0
ε''
u: 2.7 %
1.5·10^6 g/s
400·10^3 g/s
100·10^3 g/s
10·10^3 g/s
10^3 g/s
100 g/s
-50
0
50
100
ϑ (°C)



含水率依存性のいずれも，温度によって非常に顕著な影響を受けることを明らかにした．しかし，木材の誘電的性質の温度との関係を，広い温度範囲にわたり，含水率と周波数を幅広く変化させて測定した研究報告は今までに全くないと云ってよい．そこで，温度を−70℃～100℃ の範囲で変化させたとき，ε' と ε'' の挙動がどのような変化を示すかについて，含水率を全乾～約13%の範囲，周波数を 30c/s～2.5·10⁶c/s の範囲で変化させて得た実験結果によって，検討を行なった．

5.2. 実験結果と考察

誘電的な挙動の特徴をつかむためには，ε''を対象として検討をすすめると好都合であるので，Fig. 21 に u=0.9%，Fig. 22 に u=2.7%，Fig. 23 に u=10%のブナ材で得た ε'' と温度の関係を示している．u=0.9%で得た曲線は，いずれの周波数についても極大値を1つだけ持ち，高温側と低温側の両方へ向って，ε'' はなだらかに減少する．すなわち，各周波数ごとに1つの温度分散[10)18)]をもっていることがわかる．しかし，含水率が 2.7%になると，含水率が 0.9%のとき認められた温度分散のほかに，より高温側で ε'' が増大するようになり，低周波で得た曲線ほどこの傾向は著しい．さらに，u=10%になると，曲線の傾向としては u=2.7%の場合とまったく同一であり，ただ，ε'' の値が全般的に大きくなり，特に高温部での ε'' の増大は極端に著しくなった．ε', ε'' の周波数依存性，および含水率依存性で検討したように，低い含水率の木材に含まれている水の状態と，高い含水率の木材に含まれている水の状態とは，まったく異なっていることに，この原因があると考えら

れる．前者では電界の中に供試片を挿入したとき，ほとんど全乾に近い木材に吸着されている水の配向分極はほとんど不可能か，可能だとしても僅かであり，誘電的性質は木材セルロースのグルコース残基中の -OH 基の配向分極によって支配されると考えられるのに対し，含水率が高いとき，配向分極のほかに，木材中に含まれている水の導電性が影響をもつようになる．このように考えるとき，$u=0.9\%$における結果と$u=2.7\%$における結果の差が納得でき，$u=2.7\%$と $u=10\%$の間には本質的な差が存在しないことが理解できる．なお，$u=2.7\%$ですでに認めることができる高温側における ε'' の値の著しい増加は，高い含水率であるほど顕著に認めることができるが，しかし，自由水とは全く異なった挙動を示している．すなわち，Fig. 23 から，$u=10\%$の木材で，温度分散は $f=10^3$c/s のとき約 30℃ 以上に存在すると考えられるが，SMYTH-HITCHCOCK の研究によると，氷の温度分散を，$f=30$c/s で約 −20℃ に認めている．さらに，Fig. 22 と Fig. 23 を比較するとき含水率の増加に伴って温度分散の位置は低温側へ移動しており，SMYTH-HITCHCOCK の氷の結果へ近付いていることがわかる．換言するならば，含水率が高くなるに伴って，セルロース鎖に吸着されている力が小さい水分子が多くなり，その挙動は氷点下の条件のもとにある自由水と同じ誘電性を示す方向へ近付くことがわかる．そして，前章で考察を進めるにあたってとりあげた考え方，すなわち，ある含水率を境にして，木材セルロース鎖上に吸着されている水は，含水率の増加とともに小さな緩和時間をもつものが多くなり，自由水とは異なるが類似の状態へ近くなると云う考えと相いれる．

さて，DEBYE は配向分極を，

$$P_0=\frac{N\mu_p^2E}{3kT} \qquad \cdots\cdots(5\cdot1)$$

で表わし，[5] ここで，N は永久双極子の数，μ_p は双極子能率，E は外部電界，k は BOLTZMANN 定数，T は絶対温度である．すなわち，配向分極は絶対温度に逆比例する筈である．これは気体について述べている式であって，木材のような固体について，誘電特性に関する詳細な議論を行なうことはきわめて複雑である．しかし，半定量的な理解は気体についての考え方をもとにして得られるものである[5]ので，ここでもとりあげた．さらに，木材が水を含むとき，すでに前にも述べたように，木材の電気伝導度が含水率の増加とともに飛躍的に増加し，導電性の分散とも云えるもの[22]が認められる低周波域でも，温度の影響が大きくなることは論をまたない．

木材の誘電的な性質が，温度によってどのような影響を受けるかについての研究報告は，前述のように非常に少ないが，CLARK, J. D.-WILLIAMS, J. W.[2] は，温度が上昇するときセルロース・ミセルと吸着イオン間の結合がゆるみ，そのために木材の直流伝導度は上昇すると報告し，VON HIPPEL, A. R.-DIETZ, A. G. H.[9)39)]は誘電率を測定し，全乾木材で正の，含水率 6 %の木材で負の温度係数を認めている．また，中戸[39]は含水率 2～14%の木材の誘電率は正の温度係数をもつとしている．上村[39]は温度約 20℃～80℃ の範囲で，気乾材と飽水材の誘電率を求め，温度の上昇に伴って誘電率は増加することを報告している．このような報告は，いずれも温度範囲，含水率範囲，周波数の範囲など，測定条件の設定が必ずしも十分であるとは云いがたい．すなわち，Fig. 21～Fig. 23 で ε'' が極大値をもつと云うことは，温度分散が存在することであり，温度分散が現われる温度を中心にしてその附近で，木材の誘電的な性質は特異な挙動を示すことになるが，上述の研究者達は

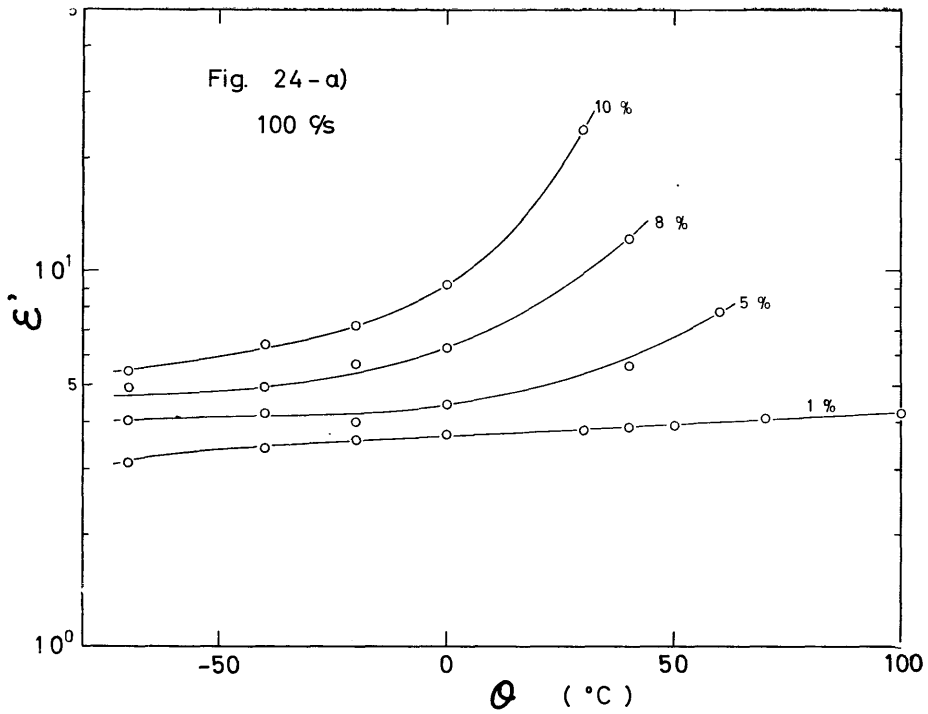


Fig. 24 - a)
100 %s
10 %
8 %
5 %
1 %
ε'
10^1
5
10^0
-50
0
50
100
ϑ (°C)

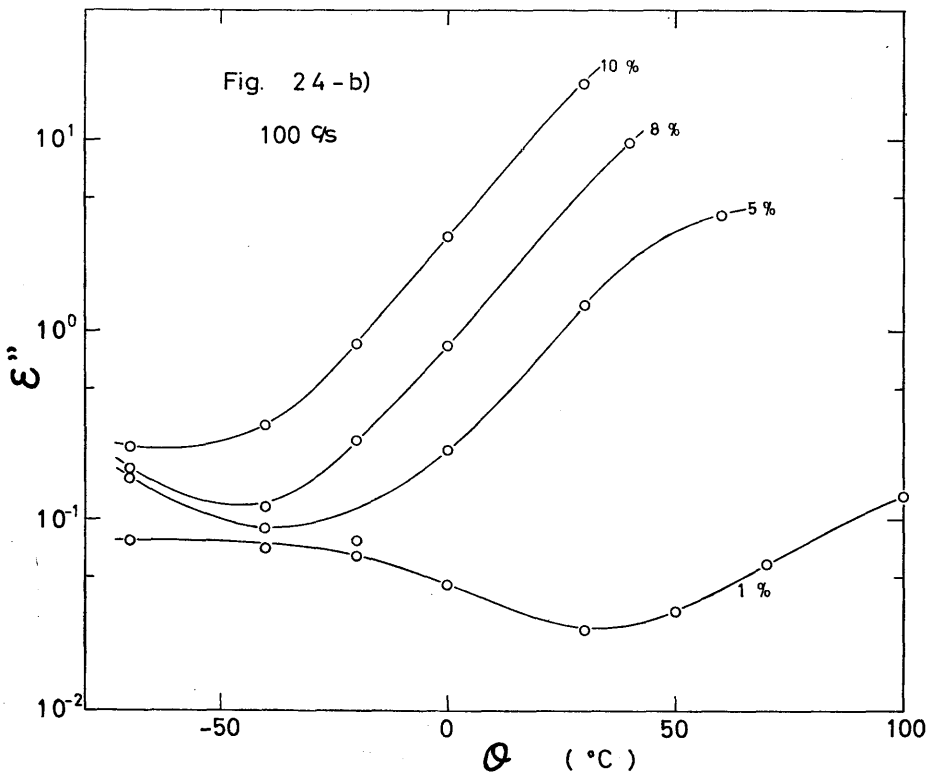


Fig. 24 - b)
100 %s
10 %
8 %
5 %
1 %
ε''
10^1
10^0
10^-1
10^-2
-50
0
50
100
ϑ (°C)

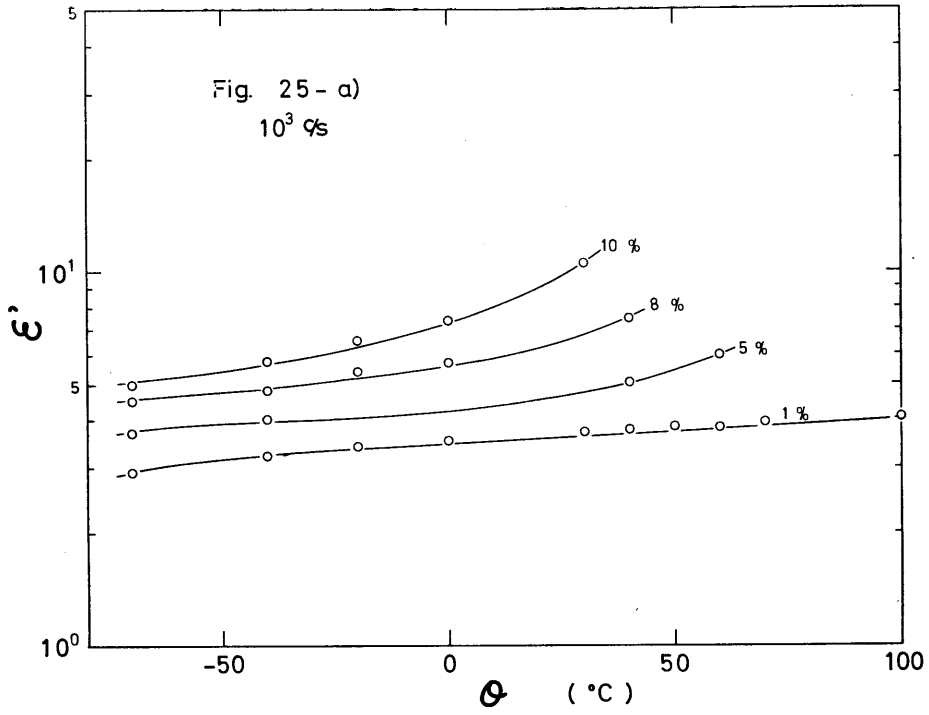


Fig. 25 - a)
10³ c/s
ε'
10 %
8 %
5 %
1 %
5
10¹
5
10⁰
-50
0
50
100
ϑ (°C)

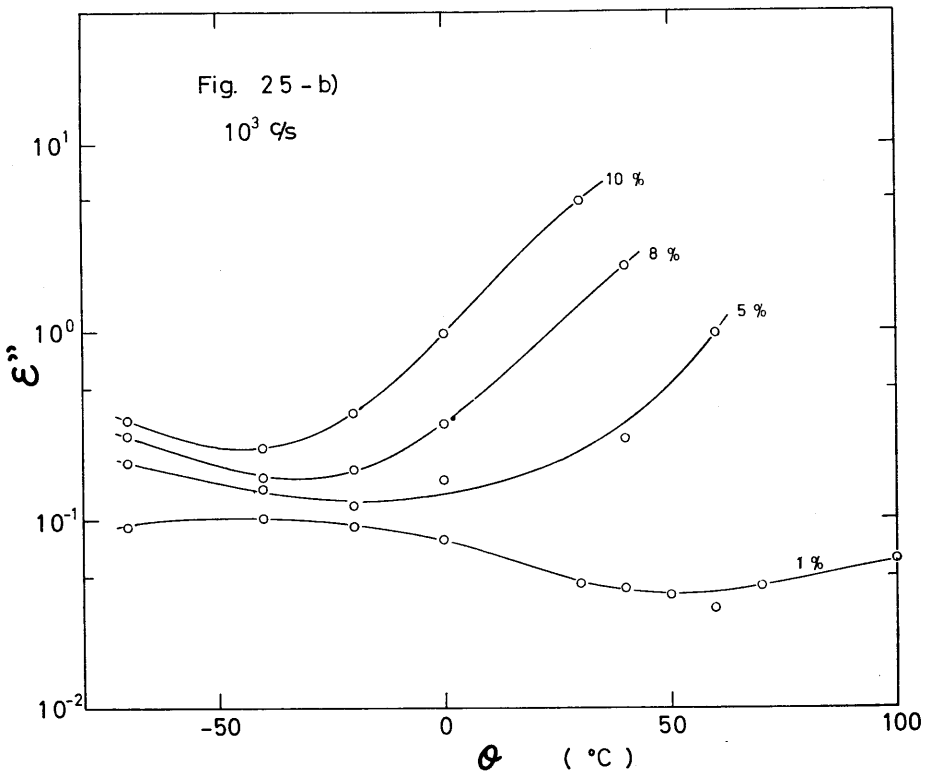


Fig. 25 - b)
10³ c/s
ε''
10 %
8 %
5 %
1 %
10¹
10⁰
10⁻¹
10⁻²
-50
0
50
100
ϑ (°C)

このような意味で ε' と温度の関係を十分に検討していない．そこで，ε' と ε'' への温度の影響をさらに詳細に検討してみる必要を認めた．

含水率が変わると，誘電性の温度依存性が変化することが Fig. 21～Fig. 23 でわかっているので，周波数が 100c/s の場合，$u=10\%$，$u=8\%$，$u=5\%$，$u=1\%$のそれぞれの含水率について，ε' および ε'' と温度の関係を Fig. 24 に示す．$u=1\%$では，ε' と温度の関係は正の勾配をもつ直線で表わされ，ε'' と温度の関係は温度 30℃ 附近に谷をもつ曲線であるにもかかわらず，$u=5\%$より高い含水率では，温度の上昇に伴って ε' は緩な勾配で増加し，ある温度を境にして ε' は急勾配で上昇するようになり，ε'' は曲線の谷が約 −30℃ よりも低温側に現われ，含水率が高い程，低温側へ谷は移動する．ε' の温度に対する曲線の勾配が変わる温度は，高い含水率における程，低温側に現われる傾向にあり，高温部の勾配は高い含水率のものほど大となり，特に，含水率が異なるときの高温部での勾配の差は著しい．さらに，ε''と温度の関係から，含水率 1 %の場合には温度分散の位置は約 −70℃ と 100℃ よりも幾分高温側の 2 個所に認めることができ，含水率 5 %では約 60℃よりもやや高い温度側にのみ温度分散を認め，低温部では ε'' の値の増加が認められる．ε' と ε'' の周波数依存性の検討によって，$f=100$c/s 位の周波数のとき，木材の誘電性は木材に含まれている水と密接な関係をもつことがわかっており，Fig. 24 でも $u=1\%$ と $u\geqq5\%$の曲線の間に認められる挙動の差は，結局，木材実質中に含まれている水と関係するものであることがわかる．さらに，堤—渡辺[36]は ε'' と温度の関係から，高温側の温度分散は木材実質中の水と特に関係があると報告しているが，さらに，次のようなことが云えるであろう．すなわち，$f=100$c/s の電界中の木材は，ほとんど全乾に近い低含水率の場合の温度分散が約−70℃ 附近，あるいはもっと低温側と，100℃ よりも高温側の 2 個所に存在しているが，含水率の増加とともに，高温側の分散は ε'' の値が数桁も増加することになり，明らかに高温側の温度分散は含水率と密接な関係があることを示している．また，$f=100$c/s の電界で問題となるのは，界面分極に原因する分散であり，そのような意味からも木材中に存在する水と関連づけて考えることができる．低周波領域から高周波の方へ周波数が増加するとともに，界面分極に原因する分散は支配的でなくなり，双極子の回転に原因する分極が支配的となるので，順次，周波数を高くした場合の結果を図示している．Fig. 25 は $f=10^3$c/s で得られた ε'，ε'' と温度の関係である．$f=100$ c/s で得られた結果と比べて，高温部での ε' の増加の程度が小さく，温度分散の位置，特に低温側の温度分散の位置は高温側へ移動している．$u=1\%$で温度分散が約 −50℃ と 100℃ よりやや高温側の 2 個所に認められ，低温側の ε'' の極大値は 100c/s におけるよりも値が大きく，高温側の ε'' の極大値は 100c/s におけるよりも小さいと推定できる．さらに高い含水率，$u=5\%$，$u=8\%$，あるいは $u=10\%$のいずれにおいても，$f=100$c/s で得た ε'' の値に比べて，$f=10^3$c/s で得た値は高温側で小さくなっている．なお，ε'' の曲線の谷部は，周波数の増加によって幾分高温側へ移動している．さらに高い周波数 $f=10\cdot10^3$c/s では，Fig. 26 に示すように ε'，ε'' の挙動は低い周波数の場合と比べ，顕著な変化がうかがえる．すなわち，ε' と温度の関係は，低温側の温度分散の位置で僅かに外れるとは云え，$u=1\%$から $u=10\%$ の範囲すべてにおいて，ほとんど直線関係が存在している．また，$u=1\%$で低温側の温度分散が約 −25℃ に認められ，高温側の温度分散をほとんど認めなくなっている．$u=5\%$で低温側の温度分散を約 −70℃ に認めたが，$u=8\%$，

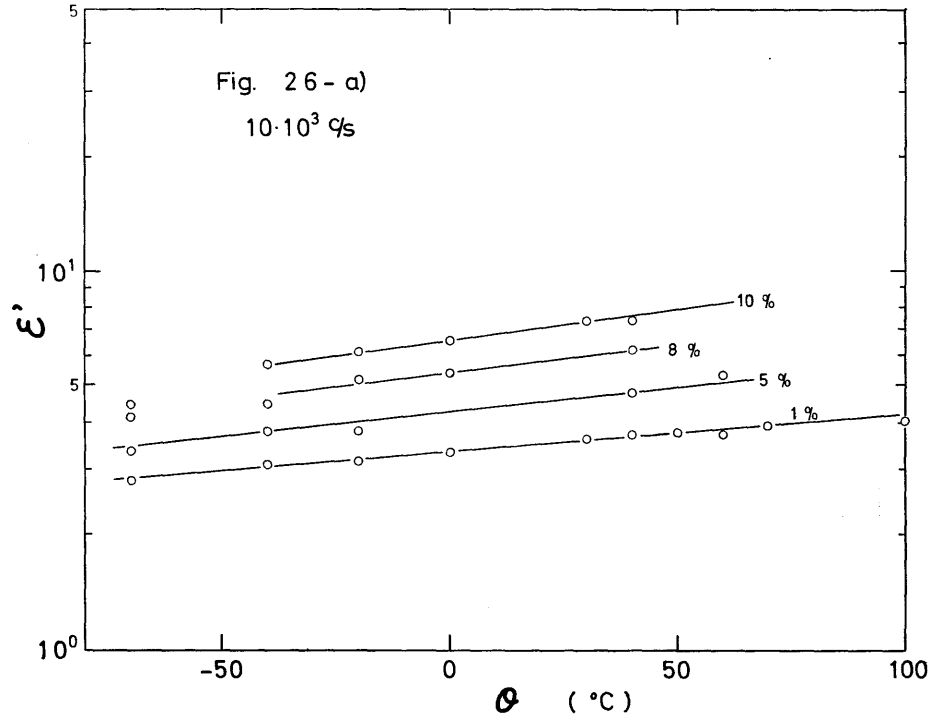


Fig. 26 - a)
10·10³ c/s
ε'
10 %
8 %
5 %
1 %
ϑ (°C)

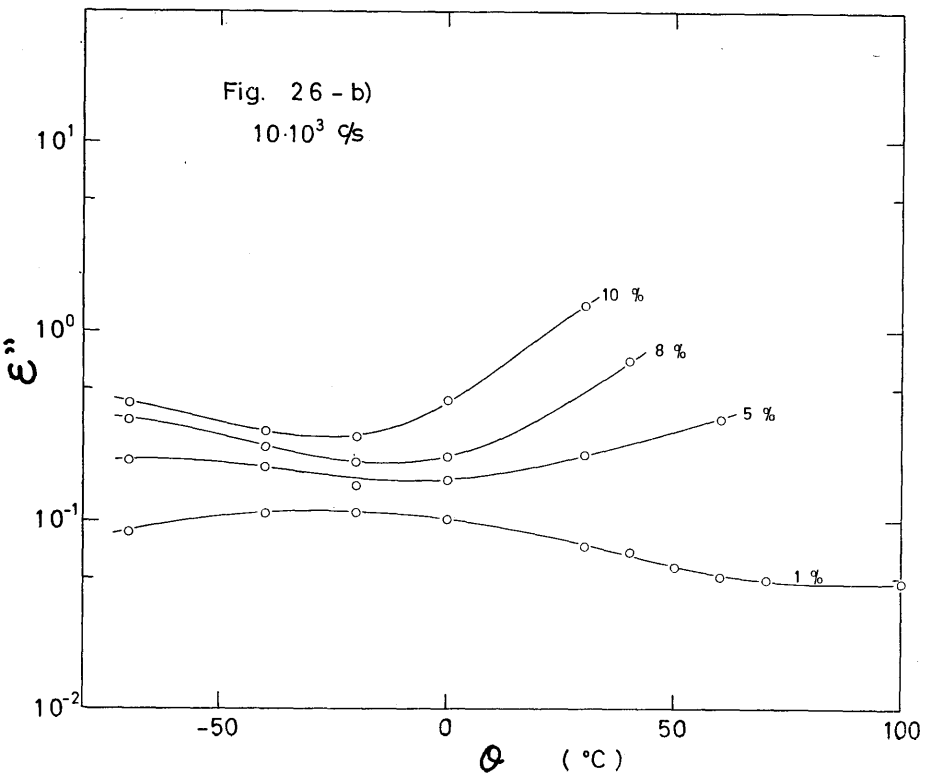


Fig. 26 - b)
10·10³ c/s
ε''
10 %
8 %
5 %
1 %
ϑ (°C)

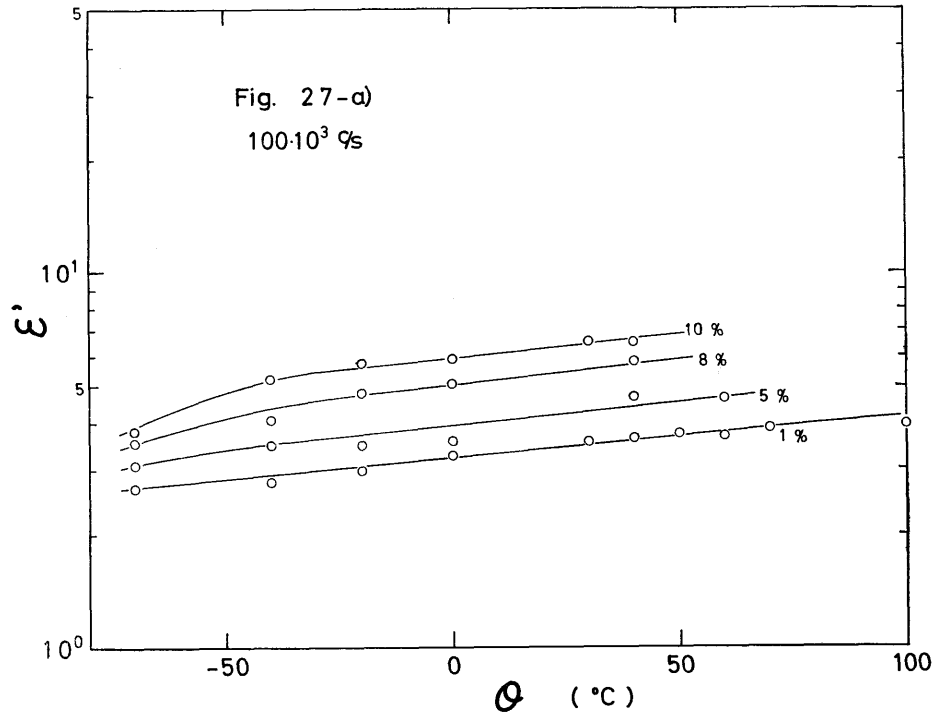


Fig. 27-a)
100·10³ %s
ε'
10 %
8 %
5 %
1 %
5
10¹
5
10⁰
-50
0
50
100
ϑ (°C)

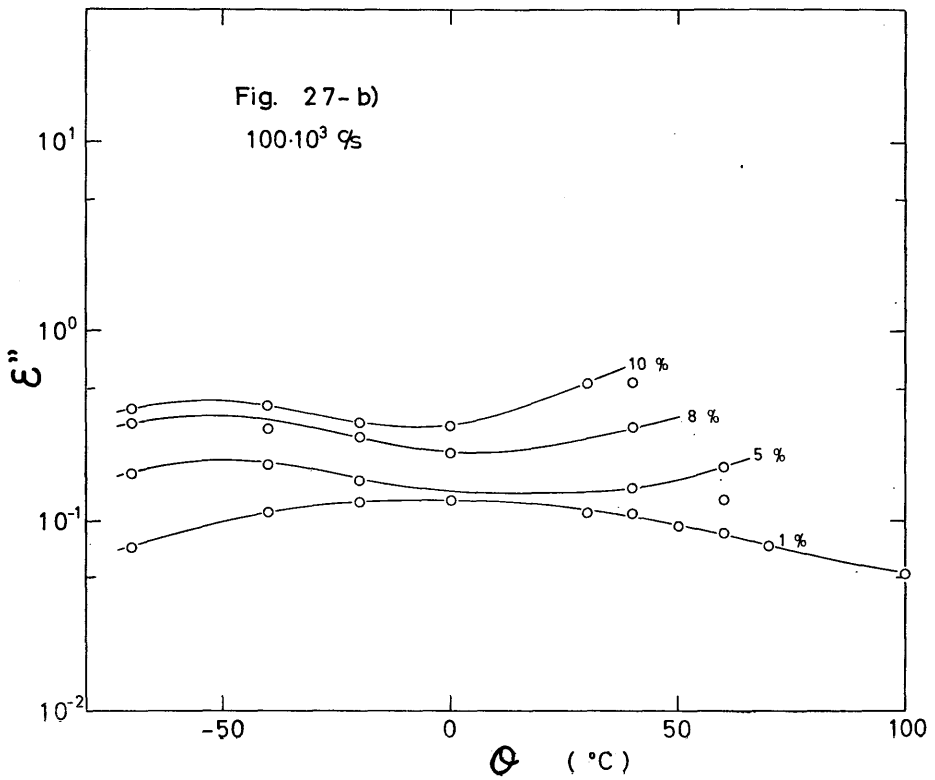


Fig. 27-b)
100·10³ %s
ε''
10 %
8 %
5 %
1 %
10¹
10⁰
10⁻¹
10⁻²
-50
0
50
100
ϑ (°C)

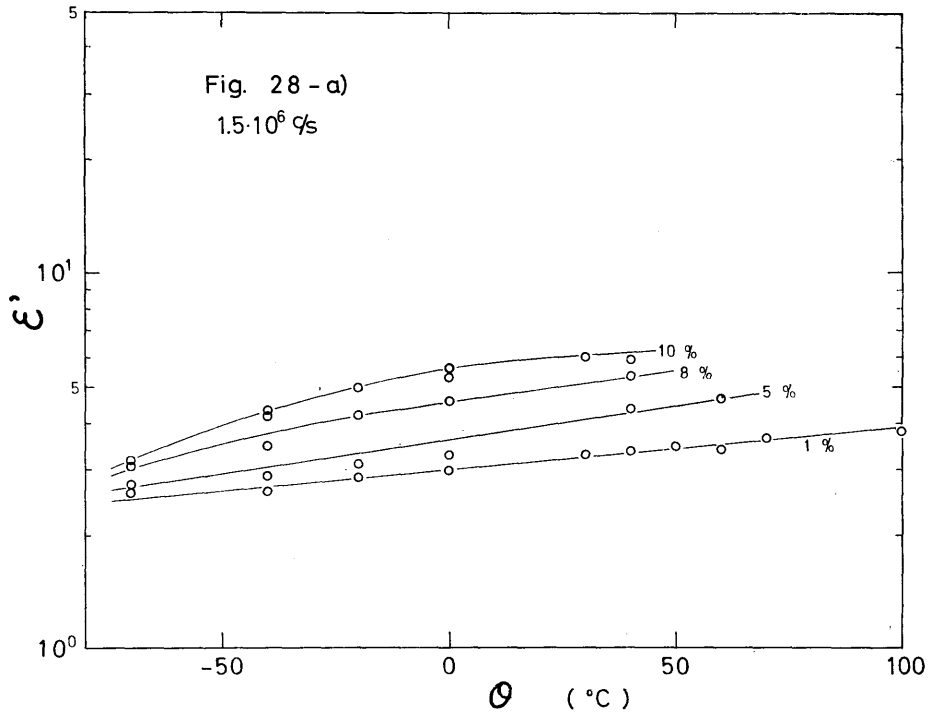


Fig. 28 - a)
1.5·10⁶ c/s
ε'
10 %
8 %
5 %
1 %
ϑ (°C)

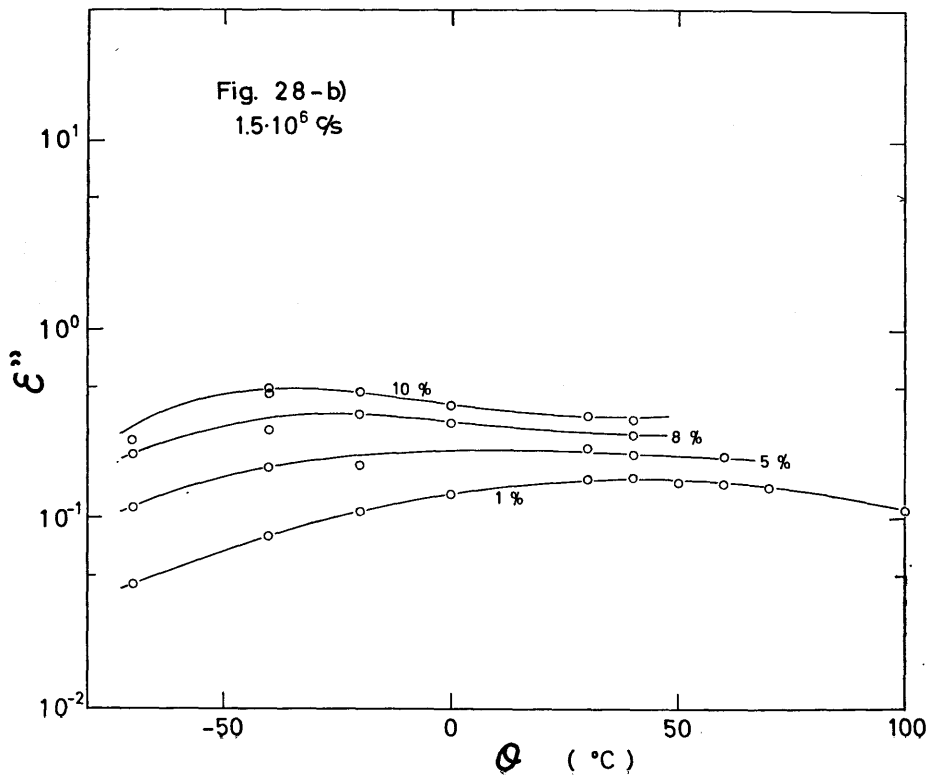


Fig. 28 - b)
1.5·10⁶ c/s
ε''
10 %
8 %
5 %
1 %
ϑ (°C)

$u=10\%$では低温側の温度分散の位置を確認することはできなかった．$u=5\%$，$u=8\%$，$u=10\%$の場合の高温度側の ε'' は Fig. 24, Fig. 25 に比べ，はるかに小さい値を示している．$f=100\cdot10^3$c/s，$f=1.5\cdot10^6$c/s で得た ε'，ε'' と温度の関係を，Fig. 27, Fig. 28 に示す．$u=1\%$の場合の低温側の温度分散は，今迄よりもさらに高温側へ移動し，$f=100\cdot10^3$c/s で約 −5℃，$f=1.5\cdot10^6$c/s で約 40℃ に認められ，高温側の温度分散は全く認めることができなくなった．$u=5\%$，$u=8\%$，$u=10\%$の場合の温度分散は高温側へ移動し，低温側の ε'' の値が極大値をとる温度は $f=100\cdot10^3$c/s で約 −70℃～−30℃ の範囲，$f=1.5\cdot10^6$c/s で約 −40℃～15℃ の範囲にあり，高い含水率の曲線ほど低温側に温度分散の位置が認められる．高温側の温度分散は，周波数の増加とともにますます認めにくくなり，$f=1.5\cdot10^6$c/s においては全く認めることができなかった．Fig. 27, Fig. 28 のいずれにおいても，ε' と温度の関係は，分散の位置を除きほとんど直線関係で示される．

さて，周波数をいろいろ変化させたときの，ε'，ε'' と温度の関係について検討を行なってきたが，周波数を高くすればする程，高温側の ε'' の値が小さくなり，また，ε'' の曲線の極大値を認めにくくなり，当然のことながら ε' と温度の関係は直線で表わされるようになる．結局，高温部での温度分散は高周波の電界中では期待できないと云える．また，ほとんど全乾に近い含水率の木材では，高温部の ε'' の値が小さいが，周波数が高くなければ，含水率が高くなると高温部で ε'' の値は数桁も増加する．このようなことを考え合わせると，高温側に認められる温度分散は，前に推定したように木材実質中に含まれている水と密接な関係をもち，界面分極に原因する分散，換言するならば，導電性の分散とでも言えるものに原因すると考えることができるであろう．そして，界面分極は電子あるいはイオンが長距離（原子間距離に比べて）移動することに原因があるとしても，水イオンの移動は自由水ほど束縛が小さいものではないことが，各周波数ごとに得られた温度分散の位置，SMYTH-HITCHCOCK が得た氷の温度分散についての結果，糠沢[19]の水についての報告などと比較することによってわかった．

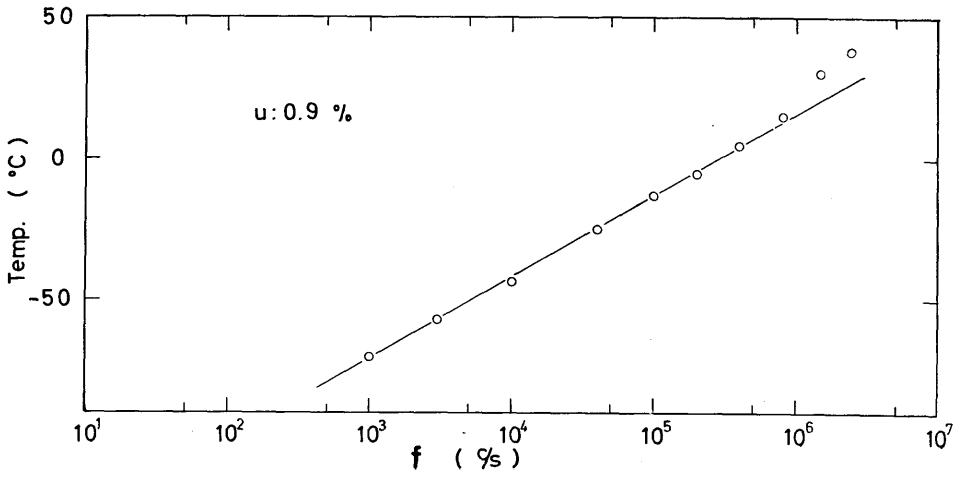
低い周波数における場合でも，低温度部分の ε' と温度の関係は，急勾配の曲線ではなく，ほとんど平坦な，直線に近い勾配で表わされる．そして，周波数の増加とともに，低温部における ε'' の極大値は僅かずつ増加の傾向にある．この傾向は，ε'，ε'' の高周波部での周波数依存性の検討の際にとりあげたように，双極子の回転に原因する配向分極によって説明できるものである．双極子の回転に基づく双極子分極は，前述の通り $10^{6\sim8}$c/s の附近に存在すると云われ，[5)16)30)] この研究でカバーしている周波数範囲では，周波数の増加とともに ε'' の値は増加の傾向をもつ筈である．このように考えると，高温部の温度分散には界面分極が主役を演じたのに反し，低温度部の温度分散には，双極子の回転による配向分極が主役を演じていることがわかる．そして，ε' と温度の関係が直線で示されるとき，主役は双極子の回転による配向分極によって演じられ，ε' と温度の関係が急勾配の曲線で示されるとき，木材実質中に含まれている水のために，界面分極が誘電性に効果を与えていると云えるであろう．

木材の誘電的な性質，ε'，ε'' あるいは $\tan\delta$ への温度の影響について，従来の報告が非常に少ないので，他の研究者達が得た結果と比較して検討を行なうことはできない．しかし，木材と同じくセルロースを主組成分とする脱脂綿，セルロース誘導体であるサク酸セルロースについての実験結果について上田[38)] は報告している．すなわち，$\tan\delta$ と温度

の関係を，同じ含水率の脱脂線とサク酸セルロースで比較するとき，tan δ の値が上昇するようになる温度は，前者の方が後者よりも高いことを認めている．上田は，この理由として，セルロースのグルコース残基の3個の -OH 基のうち，約2個はサク酸基と結びつき，脱脂綿の方が自由な状態の -OH 基が多く，この -OH 基によって吸湿性能が高く，すなわち，内部抵抗摩擦が大きくなり，吸着水分の回転成極が起こりにくくなるとしている．この研究でほとんど全乾に近い含水率の場合と，約5％の含水率の場合で，ε'' と温度の関係を示す曲線の谷部の温度に差があることがわかったが，これも吸着されている水の回転成極の容易さの差によると考えることも可能である．また，上田―志方[37]は大麦―流動パラフィン系について，100c/s～60·10³c/s で含水率約 19％のとき，−30℃～5℃ で温度分散を認め，含水率約7％のとき 100℃ 以上に tan δ の極大値を推定できる結果を報告している．また，DAVIES-MILLER-BUSSE[20] は絶縁材料 Koroseal の ε' と ε'' を，周波数 15c/s～10³c/s の範囲，温度−20℃～120℃ の範囲にわたって測定し，f=15c/s で 25℃，10³c/s で 40℃ に温度分散を認め，さらに高温側，すなわち f=15c/s で 60℃，f=60c/s で 70℃，f=10³c/s で 100℃ を境にして，高温側で ε'' の値は急勾配で増加することを認めた．周波数を 15c/s から 10³c/s に変えるとき，吸収の山（温度分散の位置）は 14℃ しか高温側へずれないのに，高温上昇部は約 50℃ もずれた．これは，低温と高温とでは誘電吸収の機構が全く異なることを示し，前者が双極子の回転によるのに対し，後者はイオン伝導によるものであるとしている．前述の上田―志方の報告[37]と DAVIES-MILLER-BUSSE の報告[20]の両者と，この研究で得られた結果は全く類似の挙動を示しており，低温側の温度分散は双極子の回転による配向分極に原因する分散であり，高温側の温度分散は導電性の分散であると云えるであろう．

測定を行なった周波数が変化すると，温度分散が認められる温度が異なることが，Fig. 21～Fig. 28 でわかっている．導電性の分散に原因する温度分散と，配向分極に原因する温度分散のうち高含水率の場合のものを，この研究では詳細に把握できなかったが，Fig. 21 と Fig. 22 ではかなり明確に，周波数の変化による温度分散の位置の移動をつかむことができる．そこで，両者の関係を Fig. 29 に示している．すなわち，含水率 0.9％の木

Fig. 29



材で，温度分散が認められる温度と周波数の対数の関係は，正の勾配をもった直線関係にあることがわかった．この含水率，温度，および周波数の条件で，分散に主役を演じているのは，前述のように双極子の回転による配向分極である．

5.3. 結　　論

この章では，木材の ε'，および ε'' と温度の関係を，含水率，測定を行なう際の各周波数ごとにまとめて検討を行なっている．そして，木材の誘電性には温度分散の存在と，温度分散は2ヶ所に認められることを確かめた．すなわち，低温部と高温部の両方に分散を認め，高温部の分散は木材の含水率と密接な関係にあり，全乾状態，さらには高い周波数の電界にあるとき，ほとんど分散を確認できないことから，界面分極に原因する分散であることを推定した．これに対して，低温部の分散は含水率とさほど密接な関係になく，その周波数の変化に対する挙動からも，双極子の回転に原因する配向分極による分散であることが明らかになった．

6. COLE-COLE の 円弧則の適用

6.1. 目　　的

無極性の高分子は誘電率 ε' が小さく，温度や周波数に影響されることが少ない．しかし，極性高分子の誘電的性質は温度や周波数によって著しく変化する．

極性液体を例にとってみると，分子のもつ双極子が電界の方向に配向しようとするとき，まわりの分子から抵抗をうけるので有限な時間がかかる．この緩和時間は高分子の種類と温度によって定まる．電界の周期が緩和時間よりも十分大きければ，双極子の配向は電界と同じ位相でおこるのでエネルギーの吸収はおこらない．また，電界の周期が緩和時間に比べて十分に小さいとき，双極子が電界の方向に配向する暇がないので，エネルギーの吸収はおこらない．電界の周期が緩和時間と同じ程度になったとき，エネルギーの吸収が最も大きくなり，誘電損失率 ε'' の極大値があらわれる．誘電率 ε' は電界の周期が小さくなるにつれて減少していく．緩和時間は温度が上昇すると減少するので，分散吸収の位置は高周波側にずれることになる．

DEBYE の双極子理論によると，複素誘電率 ε^* と周波数 $f=\omega/2\pi$ の間には，次の関係がある.[4]

$$\varepsilon^*-\varepsilon_\infty=\frac{(\varepsilon_0-\varepsilon_\infty)}{1+j\omega\tau} \qquad \cdots\cdots(6\cdot1)$$

ここで ε_0 は周波数0に相当する静的誘電率，ε_∞ は周波数∞に相当する光学的誘電率である．ω は角周波数で $\omega=2\pi f$ であり，τ は双極子の配向の緩和時間をあらわし，誘電緩和時間である．さて，(6·1) 式を整理し，実数部 ε' と虚数部 ε'' にわけると，

$$\varepsilon'=\varepsilon_\infty+\frac{\varepsilon_0-\varepsilon_\infty}{1+\omega^2\tau^2} \qquad \cdots\cdots(6\cdot2)$$

$$\varepsilon''=(\varepsilon_0-\varepsilon_\infty)\frac{\omega\tau}{1+\omega^2\tau^2} \qquad \cdots\cdots(6\cdot3)$$

になる．

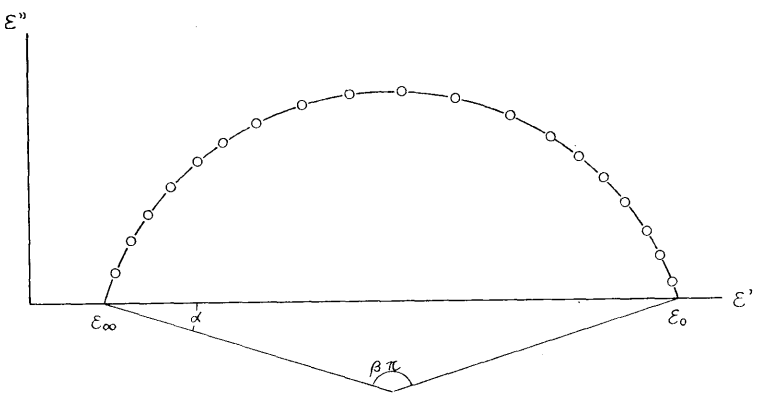
DEBYE の双極子理論が成立する極性液体では，おのおのの分子（双極子）はすべて同一の緩和時間をもつことになるので，このような系は単一緩和系とよばれるが，極性固体高分子の誘電分散は DEBYE の式で表わされる極性液体の場合よりも，ずっと幅が広がった形で示される筈である．高分子内の双極子は主鎖と結合しているので，配向にあたって極性液体の場合ほど自由でなく，かなり強い束縛をうけ，また個々の双極子が配向の際にうける抵抗は同じでない．したがって，多くの緩和時間がある幅をもって分布していると考えられ，このような双極子の系は多緩和系とよばれ，緩和時間の分布関数 $k(\tau)$ を導入して，次のように表わさねばならない．

$$\varepsilon'=\varepsilon_\infty+(\varepsilon_0-\varepsilon_\infty)\int_0^\infty \frac{k(\tau)}{1+\omega^2\tau^2}d\tau \qquad \cdots\cdots(6\cdot4)$$

$$\varepsilon''=(\varepsilon_0-\varepsilon_\infty)\int_0^\infty \frac{k(\tau)\cdot\omega\cdot\tau}{1+\omega^2\tau^2}d\tau \qquad \cdots\cdots(6\cdot5)$$

以上の検討から，ε' と ε'' は周波数，温度と関係があることがわかったが，COLE, K. S. と COLE, R. H. は多くの誘電体について，周波数をいろいろに変えて得た ε' と，ε'' の値を，横軸に ε'，縦軸に ε'' をとり，ω をパラメーターにしてプロットすると ε' 軸に直径をもつ半円で示されることを，経験的に認めた．このような分散を正規分散，あるいは DEBYE 型分散という．なお，この円弧と ε' 軸との2交点が ε_0 および ε_∞ である．さて，実際には Fig. 30 に模式的に示すように円の中心が ε' 軸からはずれ，これは緩和時間が単一の値でなくて，τ を中心にして分布しているためと考えられる．そして，これを COLE-COLE の円弧則とよび，次式で表わされる.[20]

Fig. 30



$$\dot{\varepsilon}=\varepsilon_\infty+\frac{(\varepsilon_0-\varepsilon_\infty)}{1+(j\omega\tau)^\beta}; \qquad 0\leqq\beta\leqq1 \qquad \cdots\cdots(6\cdot6)$$

そして，$\beta=1$ のとき DEBYE 型分散を示すことになり，円弧が円の中心に対して張る角から τ の分布を表わすパラメーター β が求められる．$\varepsilon_0-\varepsilon_\infty$ は異常分散の大きさを表わし，dielectric increment とよばれることもあり，$\Delta\varepsilon$ で表わされる場合が多い．$\varepsilon_0-\varepsilon_\infty$ は有極性物質の双極子モーメント μ と密接な関係があり，次式で表わされる.[6][10] すなわち，

$$\varepsilon_0-\varepsilon_\infty=\frac{3\varepsilon_0}{2\varepsilon_0+\varepsilon_\infty}\left(\frac{\varepsilon_\infty+2}{3}\right)^2\frac{4\pi n\mu^2}{3kT} \qquad \cdots\cdots(6\cdot7)$$

ここで，n は単位体積当りの双極子の数，k はボルツマン定数，T は絶対温度である．

上に述べるように，ε_0，ε_∞，さらには緩和時間の分布の程度を知ることは，誘電体の挙動を知るために非常に重要であることがわかる．そして，緩和型の分散，すなわち，永久双極子の回転，界面分極に原因する分散は，上述の COLE-COLE の円弧則で示される場合が多い.[22] そこで，この研究で得られた ε'，ε'' で COLE-COLE の円弧をプロットし，ε_0，ε_∞，さらには緩和時間の分布の程度を示す ε_∞ と COLE-COLE の円弧の中心を結ぶ直線が ε' 軸となす角（α）について検討を行なった．

6.2. 実験結果と考察

木材の誘電的分散は低周波部と高周波部の両方に認められ，前者は導電性の分散であるので，特に木材の含水率と密接な関係があることを，すでに明らかにした．そこで，低周波部の誘電分散は COLE-COLE の円弧則が適用され得るか否か，適用できるならば含水率が変化したとき，COLE-COLE の円弧にどのような影響を与えるかについて検討を加える．Fig. 31 は含水率 15%のヤナギ材で，Fig. 32 は含水率 15%のサクラ材で得た結果である．この両グラフから，COLE-COLE の円弧則は木材の低周波部の誘電分散に適用でき，ε_∞ の値として約 10，ε_0 として約 100，あるいはそれ以上を得ることができた．さらに．α は温度の低下とともに大きな角度を示すようになり，温度の低下は緩和時間の分布を広げる働きを示す方へ働くことがわかった，そこで，さらに詳細な検討を行なうために，含水率 13 %のブナ材を供試材として，温度が 30℃，0℃，−20℃，−40℃ の 4 段階で COLE-COLE の円弧をプロツトして Fig. 33 に示す．このグラフから COLE-COLE の円弧則を満足することがわかった．まず，円弧と ε' 軸との 2 交点のうち，左側の交点，すなわち ε_∞

Fig. 31

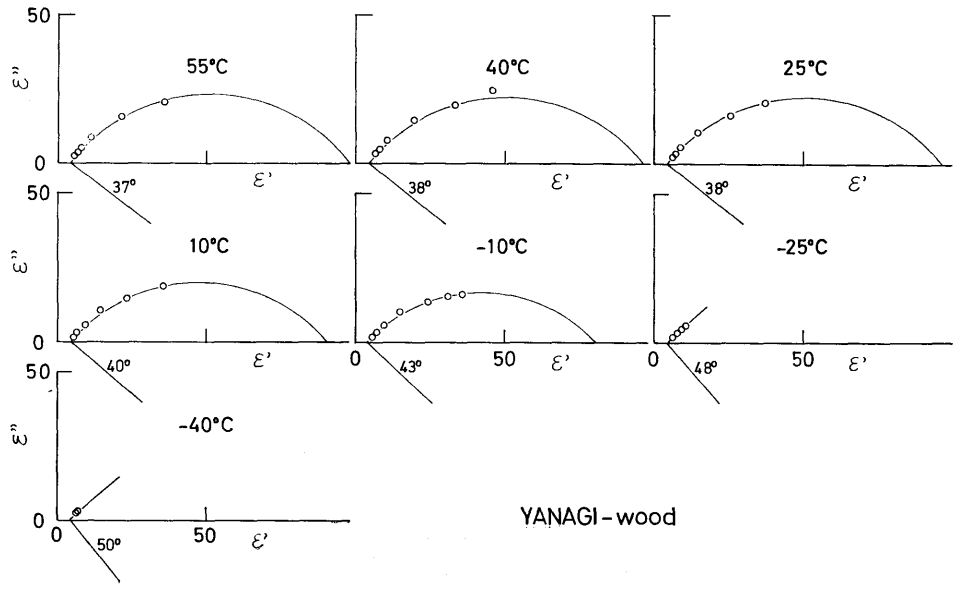
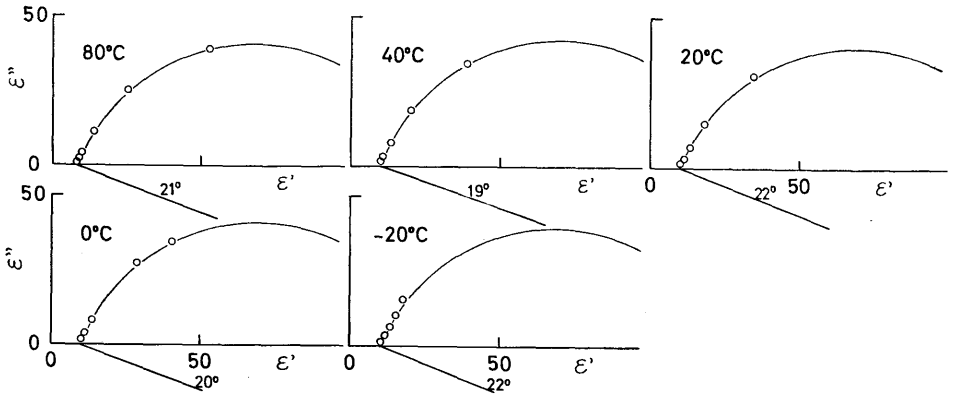


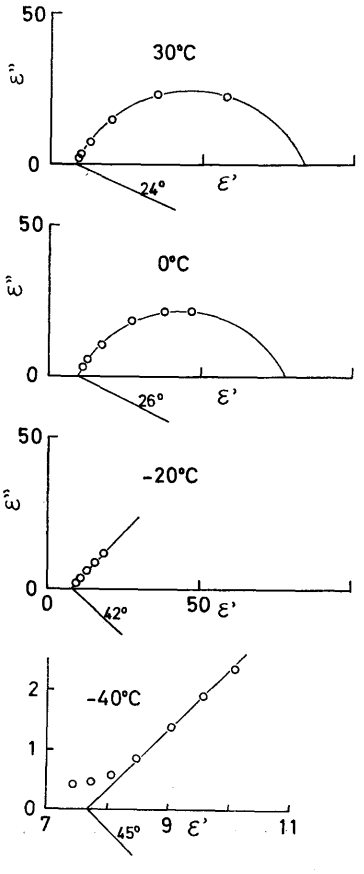
Fig. 32



SAKURA-wood

は温度の降下とともに幾分小さな値をもつようになってくるが，それにしても大略10位の値を示す．それに反して，ε_0 の値を正確につかむことは，低温の場合特に不可能であったが，0℃ と 30℃ で約80前後の値を得ることができた．そして，Fig. 31, Fig. 32 を考慮に入れても，ε_0 として約100以下の値を，さらに温度の低下とともに ε_0 の値も ε' 軸を左方向へ少しずつ移動することを認め，その移動は ε_∞ の場合におけるよりも著しいので，$\varepsilon_0-\varepsilon_\infty$ でもって表わされる異常分散の大きさは，高温におけるほど大きいと云えるであろう．円弧の中心と ε_∞ を結ぶ直線が ε' 軸となす角 α は，温度の降下とともに大きくなる傾向を示し，温度が降下するとき，導電性の分散の緩和時間の分布が大きくなることが推定される．さて，第3章の ε' と ε'' の周波数依存性の検討にあたって，低い周波数領域に存在する異常分散は，低含水率，低温度の場合認めにくくなることを明らかにした．そして，この研究の周波数範囲と実験の精度の範囲内では，低い含水率，低い温度条件における Cole-Cole の円弧がプロットできないので，考察をさらに種々の条件へ広げることはできない．なお，Fig. 33 の −40℃ におけるプロットのうち，ε' の値が小さい場合，すなわち，高い周波数で得られた場合のプロットが円弧から次第に外れる傾向にあるが，これは双極子の配向に原因する分散によるものが含まれるためである．

Fig. 33

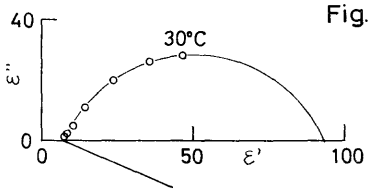


木材の誘電的な性質は，低周波領域にまで周波数範囲を広げて測定した報告が少なく，

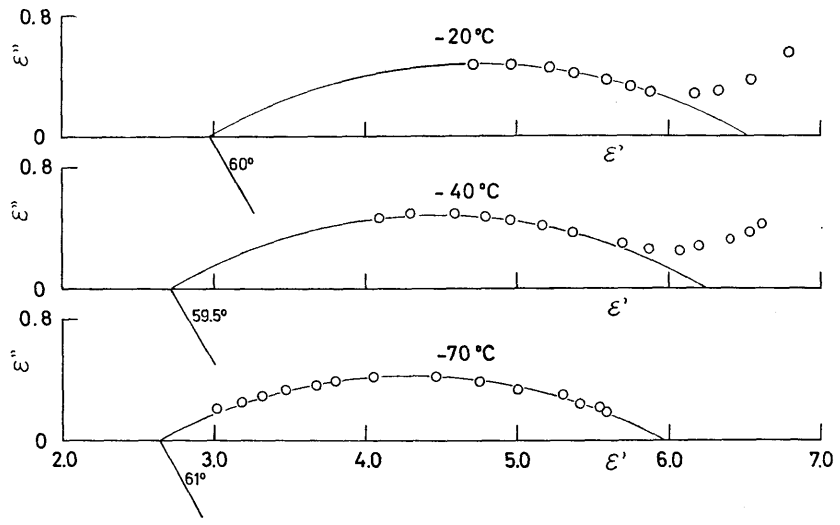
木材の導電性の誘電分散に関する COLE-COLE の円弧について論じた報告が少ないので，他の研究者の報告と比較して検討を行なうことはできない．しかし，MORGAN, S. O. によって，スレートについて得られた結果によると[20]，$\varepsilon_\infty \fallingdotseq 8$, $\varepsilon_0 \fallingdotseq 100$, $\alpha \fallingdotseq 50°$ となっている．測定温度条件や吸湿条件がはっきりしないので，詳細なことは云えないが，スレートも木材と同様に吸湿性の材料であり，木材と同様に水は結合水と自由水の2種類の型で存在すると考えることができ，MORGAN. S. O. が得た COLE-COLE の円弧は周波数範囲が数 $10 \cdot 10^3$c/s 前後で求まった ε' と ε'' によっているので，スレートの導電性の誘電分散における ε_0, ε_∞ として，上述の値を認めてもよいであろう．そして，この値はこの研究で木材について得た ε_0, ε_∞ と比較して，まったくかけはなれた値であるとは云えない．

木材の誘電分散は，上述した低周波領域のもののほかに，高周波領域（Mc単位の領域）に存在するもの，すなわち，双極子の回転に原因する配向分極によるものがあることは，今までにたびたび明らかにしてきた．そして，木材に関しての高周波領域の側定は割合に多く報告され，特に ε' については多くの研究結果が報告されている．しかし，ε_0, ε_∞, あるいは緩和時間の分布に関しての報告は全くないと云っても良いほどである．TAKEDA, M. は *Tilia* 材の誘電的挙動に関する報告で，COLE-COLE の円弧の適用について，僅かにふれている．[32)33)]

Fig. 34



	-70°C	-40°C	-20°C
ε_0	6.0	6.2	6.5
ε_∞	2.6	2.7	3.0
α	61°	59.5°	60°
$\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty$	3.4	3.5	3.5

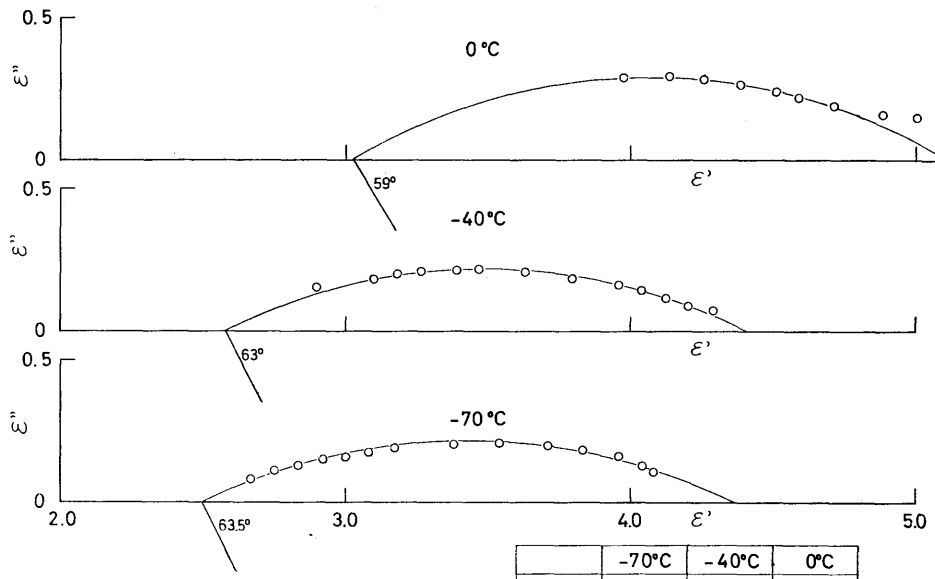


高周波領域で認められる誘電分散について，ε_0, ε_∞ を検討するために，まず，Fig. 34 に含水率10%のブナ材で，温度−20℃，−40℃，および−70℃で得られた COLE-COLE の円弧を示す．なお，ここに示しているよりも高い温度では，この実験の測定周波数範囲の

誘電分散は，導電性のものが支配的であるために省略した．さて，Fig. 34 に記載しているように，−20℃ のとき $\varepsilon_\infty \fallingdotseq 3.0$，$\varepsilon_0 \fallingdotseq 6.5$ となり，温度が −40℃ のとき $\varepsilon_\infty \fallingdotseq 2.7$，$\varepsilon_0 \fallingdotseq 6.2$ となる．さらに温度が降下して −70℃ になると，$\varepsilon_\infty = 2.6$，$\varepsilon_0 \fallingdotseq 6.0$ となり，温度の降下とともに ε_∞ の値は僅かずつ減少の傾向がある．ε_0 の値も ε_∞ についてと同様のことが云えるが，ε_0 の方が ε_∞ に比べて減少の程度が大きく，$\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty$ も温度の降下とともに，僅かながら小さくなることがわかった．(6·7) 式が成り立ち，$\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty$ が双極子モーメント μ と関係があるとするならば，温度は水を含有する木材の双極子モーメント μ に密接な関係をもつと云えるであろう．さらに，円弧の中心と ε_∞ を結ぶ直線が ε' 軸となす角は，温度 −20℃，−40℃，−70℃ で，それぞれ 60℃，59.5℃，61℃ となり，それぞれの間に大差は認められなかった．すなわち，緩和時間の分布は，この温度範囲で大差ないと云えるであろう．

木材中に含まれている水の量が変われば，当然，双極子の回転の難易に影響を与え，ε_0，ε_∞ に変化を見るであろうと推定できるので，含水率が変化したときの挙動に検討を加えるため，含水率 5％のブナ材で，温度 0℃，−40℃，−70℃ で得た Cole-Cole の円弧を Fig. 35 に，含水率 1％のブナ材で，温度 60℃，30℃，0℃，−20℃，−40℃，−70℃ で得た Cole-Cole の円弧を Fig. 36 に示す．含水率 5％のとき，0℃ で $\varepsilon_0 \fallingdotseq 5.1$，$\varepsilon_\infty \fallingdotseq 3.0$ であるが，温度の降下とともに ε_0，ε_∞ のいずれも，僅かながら値が小さくなる傾向にあり，前の含水率10％のものと同じように，$\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty$ も温度の降下とともに小さくなる傾向がうかがえる．そして，$\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty$ の値は含水率が10％から 5％まで減少したことによって，約 3 分の 2 も小さくなっていることに注意を要する．また，緩和時間の分布と関係する角度

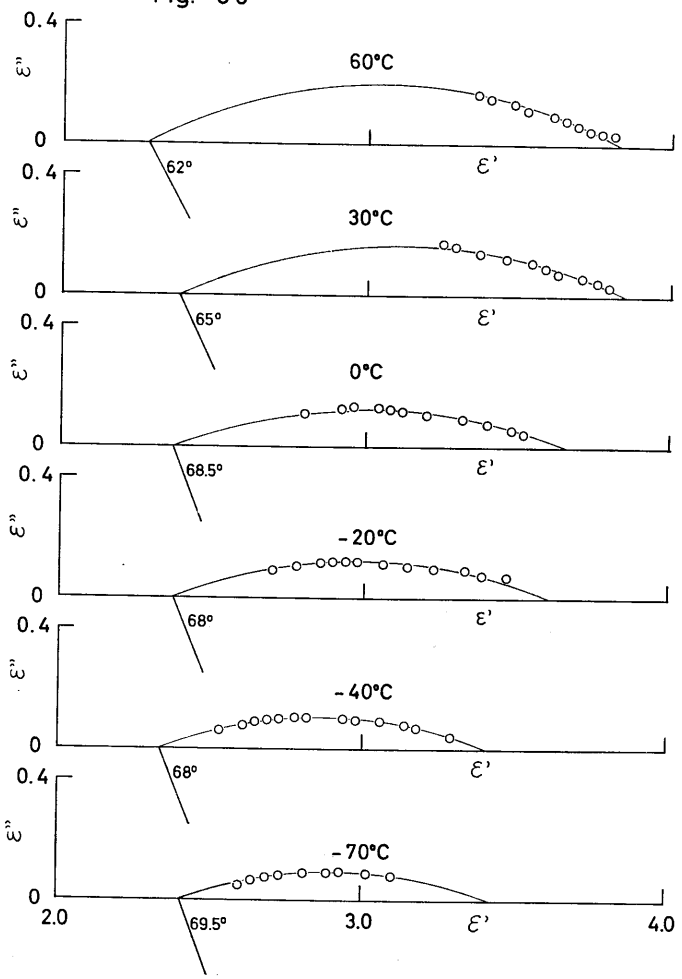
Fig. 35



	-70℃	-40℃	0℃
ε_0	4.4	4.4	5.1
ε_∞	2.5	2.6	3.0
α	63.5°	63°	59°
$\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty$	1.9	1.8	2.1

α は，やはり温度の降下とともに大きくなっている．含水率 5 %の場合も，温度が 0℃ をこえると，伝導性の分散の混入が影響して，COLE-COLE の円弧をプロットすることができなかった．さて，Fig. 36 の含水率 1 %の場合の COLE-COLE の円弧は，含水率 10%のもの，あるいは含水率 5 %のものに比べても，著しい差異を認めることができる．−70℃ を例にとると，ε_0 は含水率の低下とともに ε' 軸上を左側に移動し，含水率 1 %では $\varepsilon \fallingdotseq 3.4$ となり，含水率 10%の場合の約 1/2 近くまで減少している．さらに，ε_0 の値が急に増加するようになる温度は，含水率が高い程低い温度側に現われ，ε_0 の値の増加の割合も高含水率ほど著しいことが，Fig. 34, Fig. 35, Fig. 36 の中に記載されている表からわか

Fig. 36



	-70°C	-40°C	-20°C	0°C	30°C	60°C
ε_0	3.4	3.4	3.6	3.7	3.9	3.8
ε_∞	2.4	2.3	2.4	2.4	2.4	2.3
α	69.5°	68°	68°	68.5°	65°	62°
$\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty$	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.5

る．また，含水率1％の場合，ε_0 として 2.3～2.4 を得ており，含水率 10％，5％の場合，温度の上昇とともに ε_∞ の値も増加したのに比べ，著しい変化である．ε_0，ε_∞ の値いずれも，高い含水率の場合に比べて，含水率1％のとき温度による著しい影響を受けない．結局，このことは，全乾に近い含水率状態の木材に結合している水は，セルロースに非常に強固に束縛されているために，温度が上昇しても，著しくその双極子の回転が自由になるようなことがないが，それに対して含水率がかなり高ければ，ある温度を境にして，双極子の回転は急に自由となり，ε_0，ε_∞ の値も急に増加の傾向をもつものと考えられる．含水率が1％の場合も，温度の上昇とともに，$\varepsilon_0-\varepsilon_\infty$ は僅かずつ増加の傾向にある．さらに，ε_∞ と COLE-COLE の円弧の中心を結ぶ直線が ε' 軸となす角 α は，温度の上昇とともに小さくなる傾向を明らかにし，温度が高くなるとともに緩和時間の分布は小さくなることを推定できるであろう．なお，含水率が低くなるとともに，緩和時間の分布が大きくなることが，Fig. 34, Fig. 35, Fig. 36 に記載されている角 α によってわかる．

6.3. 結　　論

木材の誘電分散を，①低周波領域の分散—界面分極に原因する分散，あるいは導電性の分散によるもの，②高周波領域の誘電分散—双極子の回転に原因する分散，の2つに分け，それぞれで得られた ε' と ε'' が COLE-COLE の円弧則を満足するか否かを調べ，2つの分散のいずれも COLE-COLE の円弧則を適用できることがわかった．そして，両方の誘電分散の ε_0 と ε_∞ は，当然のことながら異なった範囲に存在し，界面分極に原因する誘電分散は，気乾状態で $\varepsilon_0 \fallingdotseq 100$ かあるいはそれ以下，$\varepsilon_\infty \fallingdotseq 10$ で，$\varepsilon_0-\varepsilon_\infty$ はかなり大きな値をもっているのに反して，配向分極に原因する分散では，ε_0，ε_∞ のいずれも10以下の値をもち，$\varepsilon_0-\varepsilon_\infty$ もこの研究の条件の範囲では約5以下である．結局，両方の誘電分散は異なった機構に原因していることを示しているのであろう．

高周波側の誘電分散では，含水率の低下とともに ε_0，ε_∞ のいずれも小さくなり，$\varepsilon_0-\varepsilon_\infty$ も含水率の低下とともに小さくなっており，含水率の低下は双極子モーメントを小さくしていることがわかる．また，ε' と ε'' の測定から，温度の降下と含水率の低下は，いずれも緩和時間を大きくすることを前章までに明らかにしたが，ここで含水率の低下と温度の降下は，緩和時間の分布も大きくすることを明らかにした．

この研究では，低周波側の誘電分散の測定が 30c/s までで，それ以下の測定値がないために，さらに種々の温度，含水率による COLE-COLE の円弧をプロットできなかった．もし，測定周波数範囲をもっと超低周波域に広げることができれば，さらに知見を得ることができるであろう．

7. 木材の誘電的挙動と実用場面の関係

木材の電気的な性質は，まず直流電気抵抗について，かなり古くから研究が行なわれ，その結果をもとに考案された直流電気抵抗式の含水率計が，現在では広く実用に供されている．それに反して，交流電界中に木材を置いたときの電気的な性質，木材の誘電的な性質が研究の対象におかれたのは，直流電界中の木材の性質に比べ比較的新らしい．しかし木材の電気的な性質に関する知識への木材工業の面からの要求は，直流的な性質から高周

波に対する性質まで広い周波数範囲にわたっている．すなわち，高周波型ないしは誘電型と称される含水率計，高周波乾燥，高周波成型，あるいは高周波接着など，かなり高い周波数の電界中に木材を置くことによって，それぞれの目的を達しようとする場面が非常に多く実用に供されているが，木材のその方面に関しての基礎的な資料を得るための研究が必ずしも満足できる状態でなく，多くの問題点が残されていると考えられる．このような意味から，純粋に学術的興味から出発した木材の誘電的な性質に関する研究においてさえも，実用面への寄与に大きな期待がもてるであろう．事実，木材の誘電性に関する従来の報告は，前に述べたように測定方法による制約のために，かなり高周波部，すなわち 10^6 c/s 前後の周波数での測定がおもであり，それも ε' についての検討がおもになされた．しかし，高周波加熱，接着において問題となるのは，ε' の他に $\tan\delta$ ないしは $\varepsilon''=\varepsilon'\cdot\tan\delta$ である．ε' に比べて，ε'' の測定は測定条件の僅かな変化に対しても数桁にもわたって変化することがあり，周波数をはじめ測定条件の僅かなバラツキによっても大きな誤差を生じることは，この研究ですでに述べたところである．そのために，ε' のみについての研究成果は今迄にもかなり報告されているが，ε'' にまで論及している報告は非常に少ないのが現状である．この報告では，実用的に最も多く経験する周波数，すなわち，商用電源周波数のあたりから数 Mc にわたって，ε'，ε'' に検討を加えているので，実際場面にあたったとき，種々の推定，予測を行なうための方向づけに役立つであろう．

従来，木材の誘電性の研究にあたって，含水率条件についてはかなり考慮が払われており，含水率の変化による誘電性への影響を検討するのが目的であることが多かったが，その際も周波数との関連で研究を進められることが少なかった．それに温度条件をあわせて考慮にいれることはさらに少なく，そのために含水率，周波数，温度が，何時も主要な因子を占める工業的な場面で，従来発表されている木材の誘電性に関する報告が，十分に利用されるために完全であったとは云いがたい．そのような意味で，これらの3つの因子が相互作用をもって木材の誘電的な挙動に著しい影響をもつことを，あらためて強調しておきたい．

8. 結　　論

木材の含水率，供試片が受けている電界の周波数，さらに温度の3つの因子を通して木材の誘電的な性質の挙動について検討を行ない，さらに木材へ吸着されている水の挙動についても考察を行なった．なお，木材の誘電的な性質を表わす指標として，この研究では誘電率 ε' と誘電損率 ε'' をとりあげている．

誘電率 ε' と誘電損率 ε'' の測定には，大別してブリッジ法と共振法が考えられるが，測定の誤差を小さくし，取扱いも容易であるように，この研究ではブリッジ法の一種である変成器ブリッジ法を採用した．測定を行なった周波数範囲は 30c/s～$2.5\cdot10^6$c/s にわたり，木材についての従来の多くの研究者による報告より低くい周波数領域まで，単一の測定装置がカバーすることができた．特に，木材のような間隙性伝導系では，界面分極に原因する誘電分散が期待でき，この種の誘電分散は低周波領域に存在することが考えられるので，30c/s までかなりの精度で測定できることは非常に有意義であると考えられる．一般に，含水率の変化によって木材の性質が顕著に変化することと，木材の気乾状態は約13

%前後と考えることができるので，この研究ではほとんど全乾の状態から約13%の含水率範囲にわたって測定を行なった．さらに，含水率約5%附近を境にして木材材質の含水率依存性が変わることが，すでにいろいろの方面から知られているので，特にその附近では入念な測定を行なっている．測定の温度条件は −70℃～100℃ の範囲にわたったが，高含水率で高温度の条件は，測定準備中，測定中を通じて含水率を完全に一定に保つことが不可能であるので欠測した．測定中は終始条件を一定に保つことに留意し，特に周波数はエレクトロニックス・カウンターで正確に監視した．

周波数と ε'，ε'' の関係から，ある含水率以上の木材では，誘電分散は低周波側と高周波側の2個所に認められ，前者は全乾状態では認めることができなかった．結局，他の吸湿性誘電体で認められているように，低周波側の誘電分散は界面分極に原因し，導電性の分散とみなすことができ，高周波側のものは双極子の配向分極によるものとみなしてよいであろう．この2つの誘電分散のいずれにおいても，ε' と周波数の関係を表わす曲線の変曲点，さらに，ε'' と周波数の関係を表わす曲線の極大値は，温度と含水率の変化によって高周波側へ，あるいは低周波側へと移動する．導電性の分散の場合，温度の変化によって荷電体が固体中を移動することに難易をきたし，高周波領域の分散では，温度の変化によって双極子の配向に難易を生じ，その結果として，緩和時間の温度依存性を生じることになる．また，間隙性伝導系の特徴として，木材セルロースに吸着されている水は低含水率でセルロース・ミセルに最も近く，強固に吸着され，含水率の上昇とともに，水が吸着されている点はセルロース・ミセル面から遠く離れた位置にも存在し，吸着されている水のイオン相互間にも力が働きあった状態となり，吸着されている水イオンが低含水率の場合と高含水率の場合に異なった緩和時間をもっていることが考えられる．このように考えてくると，低周波領域で認められる分散，高周波領域で認められる分散のいずれにおいても，周波数，含水率，さらに温度の相互作用の影響を著しく受けるので，木材の誘電性を論ずるにあたって，これら3つの因子のいずれも無視するわけにはいかないことがわかる．

上述のことに留意して，木材の誘電的な挙動を検討し，得られた結果を要約し列挙すると次のようになる．

1) 木材の誘電率 ε' と誘電損率 ε'' は，その木材の含水率と温度，電界の周波数の3因子の相互作用を受けて，いろいろの挙動を示す．

2) 木材の誘電性の周波数分散は，低周波領域（超低周波領域にまで広がる）と高周波領域—マイクロ波領域—の両方で認められる．前者は界面分極に原因する導電性の分散であるが，後者は双極子の回転による配向分極に原因する分散である．

3) 低周波領域の誘電分散は，含水率が高いときでも温度が十分に低いときには認めにくくなる．結局，界面分極は温度の降下とともに著しく束縛を受ける．

高周波領域の誘電分散は，温度の降下によって，低周波領域におけるものほど著しい影響は受けない．

4) 低周波領域，高周波領域のいずれの誘電分散においても，含水率，あるいは温度が高くなれば緩和時間は小さくなり，含水率あるいは温度が低くくなれば緩和時間は大きくなる．

5) 低周波領域の誘電分散は導電性に関係するために，高周波領域の誘電分散よりも木

材実質中に含まれる水の影響が大きい.

6) 約3％にも達しない低い含水率のとき，セルロース—水系は強固に結合されているために，双極子の回転による配向分極のみが存在しうる.

7) 含水率が増加するに伴って，セルロース鎖へ水が吸着されている点は増加し，さらに含水率が増加すると，吸着されている水分子への吸着—凝縮—も可能となってくる．つまり，吸着されている水分子の配向の緩和時間は，含水率の増加とともに小さくなる．この結果として，ある含水率を境にして，含水率と ε', ε'' の関係は全く異なった挙動を示し，その境となる含水率の値は周波数によって異なる.

8) 木材の誘電性には温度分散が存在し，この研究の範囲内では，低温領域の温度分散と高温領域の温度分散の2つを認めた．後者は木材の吸着水と密接な相互関係にあり，前者は全乾状態でも認めることができることから配向分極に関係することがわかった.

9) 温度分散が存在する温度は周波数によって変動する.

10) 一般に，永久双極子の回転，界面分極などに原因するいわゆる緩和型の分散はCOLE-COLE の円弧則を満足する．この研究で対象とする低周波領域の分散，高周波領域の分散のいずれでも，COLE-COLE の円弧則を満足した.

11) COLE-COLE の円弧から ε_0 と ε_∞ を求めた．低周波領域の誘電分散から $\varepsilon_0 \fallingdotseq 100$ あるいはそれ以下，$\varepsilon_\infty \fallingdotseq 10$ であり，高周波領域の誘電分散では ε_0, ε_∞ のいずれも 10 以下であった．$\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty$ は前者ではかなり大きいが，後者では約5以下であった.

12) COLE-COLE の円弧から，温度の降下に伴って，低周波領域の分散と高周波領域の分散のいずれでも，木材の誘電緩和時間の分布が大きくなる傾向が認められた.

文　　献

1) 安藤電気株式会社；誘電体損測定装置取扱説明書

2) CLARK, J. D. and WILLIAMS, J. W.; Electrical conductivity of dielectrics, Journal Phys. Chem., 37, 119(1933)

3) DAVIDSON, R. W.; The effect of temperature on the electrical resistance of wood, Forest Products Journal 8, 160(1958)

4) DEBYE, P.（中村輝太郎，佐藤弘一訳）；有極性分子(Polar Molecules) 白水社（東京）(1952)

5) DEKKER, A. J.(酒中善雄，山中俊一訳)；電気物性論入門 (Electrical Engineering Materials) 丸善（東京）(1961)

6) FRÖHLICH, H.（永宮健夫，中井祥夫訳)；Theory of Dielectrics——誘電体論　吉岡書店（京都）(1960)

7) HEARMON, R. F. S. and BURCHAM, J. N.; The dielectric properties of wood, Forest Products Research, Special Report, No. 8 (1954)

8) 比留間重次郎；木材の電気伝導試験　林試報告, No. 10 (1913)

9) JAVORSKY, J. M.; A reriew of electrical properties of wood, N. Y. State College of Forestry, Technical Publication, No. 73 (1951)

10) 角戸正夫　他編；高分子の構造と物性　丸善（東京）(1963)

11) KEYLWERTH, RUDOLF und NOACK, DETLEF; Über den Einfluß höherer Temperaturem auf die elektrische Holzfeuchtigkeitsmessung nach dem Widerstandsprinzip, Holz als Roh- und Werkstoff, 14, 162 (1956)

12) KOLLMANN, FRANZ; Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Zweite Auflage, Springer-Verlag (Berlin) (1951)
13) KRÖNER, K. und PUNGS, L.; Über das Verhalten des dielektrischen Verlustfaktors von Naturholz im großen Frequenzbereich, Holzforschung, 7, 12 (1953)
14) 黒崎重彦；収着水の透電的性質（第4報）日本化学雑誌, 73, 606 (1952)
15) KUROSAKI, SHIGEHIKO; The dielectric behavior of sorbed water on silica gel, J. Phys. Chem., 58, 320 (1954)
16) 松田種光　他編；高分子材料（試験と物性）産業図書（東京）(1962)
17) MURPHY, E. J. and WALKER, A. C.; Electrical conduction in textile I. The dependence of the resistivity of cotton, silk, and wool on relative humidity and moisture content, J. Phys. Chem., 32, 1761 (1928)
18) 日本物理学会編；高分子の物理　朝倉（東京）(1963)
19) 糠沢健次；2, 3の水溶液の粗波における吸収　科学, 17, 82 (1947)
20) 岡小天, 中田修；固体誘電体論　岩波（東京）(1960)
21) 岡小天；誘電体論　岩波（東京）(1953)
22) 押田勇雄；技術者のための物性物理　日刊工業新聞社（東京）(1962)
23) PETERSON, R. W.; The dielectric properties of wood, Ottawa Laboratory, Forest Products Research Branch, Department of Forestry of Canada, Mimeograph 0-151 (1953)
24) 志方益三, 上田静男；電気界面攪乱の研究（第11報）電気化学, 5, 93 (1937)
25) SKAAR, C.; The dielectrical properties of wood at several radio frequencies, N. Y. State College of Forestry, Technical Publication, No. 69 (1948)
26) STAMM, A. J.; The electric resistance of wood as a measure of its moisture content, Ind. Eng. Chem., 19, 1021 (1927)
27) STAMM, A. J.; The fiber saturation point of wood as obtained from electrical conductivity measurement, Ind. Chem. Anal. Ed. 1, 94 (1929)
28) 高橋　茂；誘電体損と絶縁抵抗の測定 OHM文庫（東京）(1955)
29) 高橋茂, 松崎磯一；変成器ブリッジ　電気試験所彙報, 19, 99 (1955)
30) 武井武, 岡崎　清；磁性材料・誘電体（工業化学全書31）日刊工業新聞社（東京）(1960)
31) 竹田政民；高周波電気の生物作用と生体中の水　科学, 17, 82 (1947)
32) 竹田政民；木材と電波　科学, 18, 21 (1948)
33) TAKEDA, M.; Studies on dielectric behavior of bound water in timber in the high frequency region, Bulletin Chemical Society of Japan, 24, 169(1951)
34) TRAPP, W. und PUNGS, L.; Einfluß von Temperatur und Feuchte auf das dielektrische Verhalten von Naturholz im großen Frequenzbereich, Holzforschung, 10, 144 (1956)
35) 堤寿一, 渡辺治人；木材の誘電緩和現象に関する研究（電圧と温度の影響について）未発表(要旨は第13回木材学会大会において発表)
36) 堤寿一, 渡辺治人；木材の誘電的挙動に関する研究（第2報）木材学会誌, 12, 115 (1966)
37) 上田静男, 志方益三；電気界面攪乱の研究（第16報）電気科学, 7, 52(1939)
38) 上田静男；電磁波吸収と繊維化学（第1報）電気化学, 7, 208(1939)
39) 上村　武；誘電率による木材含水率の測定に関する基礎的研究　林試報告, No. 119, 95 (1960)
40) VENKATESWARAN, A. and TIWARI, SHIVA YOGI; Dielectric properties of wood, Tappi, 47, 25 (1964)
41) 渡辺茂　他編；高分子材料試験法（高分子工学講座14）地人書館（東京）(1963)

Studies on Dielectric Properties of Wood. Effects of Frequency, Moisture Content and Temperature on Dielectric Constant and Dielectric Loss Factor.

Juichi TSUTSUMI

Résumé

Studies were made on the dielectric behavior of wood in relation to three factors, moisture content of wood, frequency of electric field and temperature the test piece is subjected to, and also on the behavior of adsorbed water. In this studies, the dielectric constant ε' and the dielectric loss factor ε'' were used as the indexes expressing the dielectric properties of wood.

The methods of measuring the dielectric constant ε' and the dielectric loss factor ε'' are classified into two, the bridge methods and the resonant methods. In the present studies the transformer bridge method, one of the former classification, was adopted for accuracy and ease of measurement.

The frequency range covered in the measurements was $30\sim2.5\times10^6$ c/s. This covers much lower frequency region than the reports by many workers in the past, and this wide frequency range could be covered with a single measuring apparatus. With such substance as wood especially, the dielectric dispersion due to interfacial polarization can be expected, and such dispersion is expected to be in the lower frequency region. Therefore, it is of high significance that the measurement could be made with fair accuracy down to 30 c/s.

Generally, the physical and mechanical properties of wood change markedly with the change of moisture content. Therefore, the measurements were made over the moisture content range of from the oven dry condition to the air dried condition. As it had been known well from various angles that the effect of moisture content on the properties of wood changes at around 5% of moisture content, measurements were made epsecially carefully near 5% of moisture content.

The temperature ranged from -70℃ to 100℃. However, as it was impossible to hold the moisture content constant under high moisture and high temperature conditions, the measurements were not made under those conditions. Special care was exercised to keep the conditions constant during the preparation and the measurement, and especially the frequency was watched with an electronic counter for accuracy.

With respect to the relation between the frquency and ε' and ε'', the dielectric dispersion was observed at a low frequency and at a high frequency with specimens of moisture content of a certain value and over, but the dielectric dispersion in the lower frequency region could not be observed with the oven dry specimen. It may be concluded that, as has been observed with other dielectrics, the dielectric dispersion

in the lower frequency region is the conductive dispersion due to interfacial polarization and that in the higher frequency region due to dipole or orientation polarization. In either of these two types of dielectric dispersions, the point of inflection of the curve expressing the relation between ε' and frequency and the maximum value of the curve expressing the relation of ε'' and frequency move either towards higher frequencies or towards lower frequencies according to the changes of temperature and moisture content. In the case of the dispersion due to interfacial polarization, the polarization is influenced by temperature, and in the case of the dispersion observed in the higher frequency region, the orientation of dipoles is affected by temperature, and these cause the temperature effect of the relaxation time.

With respect to adsorbed water on the wood cellulose, water is adsorbed fast very close to the surface of the micell in the case of low moisture content wood, and as the moisture content rises, the distribution of adsorbed water comes to be widened to locations farther apart from the micell surface, and the force interacts among ions of the adsorbed water. These are caused the difference of relaxation time between the case of low moisture content and the case of high moisture content.

From the foregoing considerations, both the dispersion in the lower frequency region and that in the higher frequency region are influenced greatly by frequency, moisture content and temperature, and neither of these three factors could be neglected in the treatment of the dielectric properties of wood.

The studies of the dielectric behavior of wood with due attention paid to the foregoing considerations led to the following results.

1) The dielectric constant ε' and the dielectric loss factor ε'' show a variety of behavior influenced by the three factors, —— moisture content, temperature, and frequency of the electric field.

2) The frequency dispersions of the dielectric properties of wood are observed in both the lower frequency region (including the ultralow frequency region) and the higher frequency region (micro-wave region). The former is the dispersion due to interfacial polarization, and the latter the dispersion due to rotation of dipoles or orientation polarization.

3) The dielectric dispersion in the lower frequency region is difficult to observe when the temperature is low enough even if the moisture content is high. After all, the interfacial polarization is suppressed greatly by low temperature. The dielectric dispersion in the higher frequency region is not affected so much by low temperature as that in the lower frequency region.

4) Both with the dispersion in the lower frequency region and that in the higher frequency region, the higher the moisture content or the temperature, the smaller the relaxation time, and vice versa.

5) The dielectric dispersion in the lower frequency region is related to the conductivity and consequently is affected more by water contained in wood substance

than that in the higher frequency region.

6) In the case of very low moisture content, less than approximately 3 %, the cellulose and water are combined fast and there can exist only the orientation polarization due to rotation of dipoles.

7) As the moisture content rises, water is adsorbed on more points on the cellulose chain, and if the moisture content increases still more, adsorption on the water molecules adsorbed on the wood, ——condensation——, becomes possible. Namely, the relaxation time of the orientation of the adsorbed water molecules becomes smaller as the moisture content rises. As a result, the relation between moisture content and ε' and ε'' shows completely different behavior below and above a certain value of moisture content. And the boundary value of moisture content varies with frequency.

8) There exists the temperature dispersion with the dielectric properties of wood, and in the present studies, two types of temperature dispersion were observed, namely the temperature dispersion in the lower temperature region and that in the higher temperature region. The latter is closely related to the adsorbed water on the wood, and the former was found to be related to orientation polarization from the fact that it could be observed even in the oven dry condition.

9) The temperature at which the temperature dispersion exists varies with frequency.

10) Generally, the dispersions due to rotation of dipoles and interfacial polarization satisfy the COLE-COLE circle diagram. Both the dispersion in the lower frequency region and that in the higher frequency region in the present studies satisfy the COLE-COLE circle diagram.

11) ε_0 and ε_∞ were obtained from the COLE-COLE plot. With the dielectric dispersion in the lower frequency region, ε_0 was approximately 100～150 and ε_∞ approximately 10, and with the dielectric dispersion in the higher frequency region both ε_0 and ε_∞ were smaller than 10. The value of $\varepsilon_0-\varepsilon_\infty$ was fairly large with the dispersion in th lower frequency region, but that in the higher frequency region was smaller than 5.

12) From the COLE-COLE circle diagram, there was observed a tendency of the distribution of the dielectric relaxation time of wood increasing with the fall of temperature both in the case of dispersions in the lower frequency region and in the higher frequency region.